

Die Durchschlagsfestigkeit von luftübersättigtem Öl und Öl-Papier-Dielektrikum

Von Robert Strigel und Heinrich Winkelkemper*)

DK 621.315.615.2.015.5

Aufgabenstellung

In ölgefüllten Hochspannungsgeräten wird neuerdings in zunehmendem Maße ein Gaspolster über dem Ölspiegel vorgesehen, das die Volumenänderungen des Öles bei Temperaturschwankungen aufnehmen soll, damit der Ölbehälter nach außen hin hermetisch abgeschlossen werden kann. Von dem Gas, das dieses Polster ausmacht, wird ein Teil bis zur Sättigungsmenge im Öl gelöst. Da das Gaslösungsvermögen des Öles außer von der Öltemperatur auch vom Druck des Gaspolsters abhängt, kommt es bei einer raschen Abkühlung des Gasvolumens, wie sie bei einem plötzlich auftretenden Gewitterregen eintreten kann, zu einer Übersättigung des Öles mit Gas. Dadurch werden, wenn das Gerät unter Spannung steht, unter Umständen Gasblasen im Öl ausgeschieden, die die Durchschlagsfestigkeit beeinflussen.

Diese Verhältnisse legen es nahe, den Einfluß der Gasübersättigung im Öl auf den Durchschlag quantitativ zu erfassen, um Anhaltswerte für die Bemessung der Isolierung zu erhalten. Im folgenden werden Versuchsergebnisse mitgeteilt, die in diese Richtung zielen. Bei diesen Untersuchungen wurde zunächst die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von Gasen im Öl nicht berücksichtigt, also ausschließlich bei Raumtemperatur gearbeitet¹⁾.

Gaslöslichkeit und Gasübersättigung durch Druckentlastung

Die Gaslöslichkeit in einem bestimmten Öl folgt streng dem Henryschen Gesetz. Sie ist also bei konstanter Temperatur für ideale Gase proportional dem jeweiligen Partialdruck des ungelöst über der Flüssigkeit verbleibenden Gases [1 bis 3]. Dünnflüssige Öle lösen mehr Gas als dickflüssige. Man hat also bei Transformatorölen mit erheblicher Gasaufnahme zu rechnen. Die Löslichkeit ist ferner abhängig von der Art des Gases. Für Sauerstoff ist sie größer als für Stickstoff. Die Sättigungsmenge gelöster Luft in Transformatoröl bei Atmosphärendruck und 20 °C wird mit 10 bis 11 Vol.-% angegeben. Dabei beträgt der Sauerstoffanteil etwa 30 % des gelösten Gasvolumens.

Wegen der Druckabhängigkeit der Gaslöslichkeit entsteht durch plötzliche Druckentlastung in einem abgesättigten Öl eine Gasübersättigung, so daß eine Abgabe der überschüssigen Gasmenge einsetzen muß. Durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes kann sie beschleunigt werden. Dabei bilden sich namentlich an den Elektroden kleine Bläschen, die zur Oberfläche aufsteigen. Mit zunehmender Feldstärke wird die Bläschenbildung stärker und

nimmt, sobald Vorentladungen einsetzen, stürmischen Charakter an, wie Bild 1 und 2 erkennen lassen (siehe auch [2]). Ob und wie stark durch diese Bläschenbildung die Durchschlagsfestigkeit des übersättigten Öles beeinflusst wird, soll im folgenden gezeigt werden.

Versuchsdurchführung

Die Durchschlagsfestigkeit wurde in reinen Ölfunkentrecken mit VDE-Kugelkalotten und Spitze-Platte-Elektroden sowie an Öl-Papier mit Rogowski-Elektroden untersucht. Um die Gasabscheidung gut beobachten zu können, wurden durchsichtige Prüfgefäße verwendet, und zwar für die Messungen an reinen Ölfunkentrecken ein Gefäß mit waagerechter Elektrodenanordnung, dessen Abmessungen aus Bild 3 zu ersehen sind, und für die Messungen am Öl-Papier-Dielektrikum ein Gefäß mit senkrechter Elektrodenanordnung nach Bild 4.

Das verwendete Öl, ein handelsübliches Transformatoröl, das als „gasfest“ bezeichnet werden kann [4], war fabrikmäßig aufbereitet. Es wurde durch Glasfilter in das Versuchsgefäß eingefüllt. Als Sättigungsgas hat man der Einfachheit halber getrocknete Luft verwendet. In das für die reinen Ölversuche verwendete Gefäß, das 7 l Inhalt hatte, wurden 6 l Öl eingefüllt, und in dem verbleibenden Volumen wurde der gewählte Luftdruck eingestellt. Zur Beschleunigung der Gasaufnahme wurde das Ölgefäß heftig geschüttelt. Dabei wurde die Druckabnahme beobachtet. Als abgesättigt wurde ein Öl betrachtet, wenn beim Schütteln keine weitere Druckabnahme festgestellt wurde. Durch das Schütteln konnte die Absättigungszeit von mehr als 40 h auf etwa 2 h herabgesetzt werden.

Die Untersuchungen wurden auch auf das Misch-Dielektrikum Öl-Papier ausgedehnt. Dabei wurde die Spannungsbeanspruchung sowohl senkrecht zu den Schichten des Papierpaketes als auch parallel zu ihnen gewählt. Diese Versuche wurden in einem zweiten, senkrecht stehenden Versuchsgefäß vorgenommen, das aus einem oben und unten abgeschlossenen Plexiglasrohr bestand (Bild 4). Untersucht wurde Natronzellulosepapier von 0,1 mm Dicke, das für die Beanspruchung senkrecht zu den Schichten in einer variablen Anzahl von Scheiben von 150 mm Dmr. auf dem metallischen Boden des Prüfgefäßes gestapelt wurde. Als Gegenelektrode wurde eine Rogowski-Elektrode von 60 mm Dmr. verwendet, die in Araldit eingegossen war, um Gleitentladungen an den Elektrodenrändern zu vermeiden. In den Elektrodenstift war eine starke Druckfeder eingebaut, durch die ein konstanter Anpreßdruck gewährleistet war. Die Papierscheiben wurden sorgfältig entgast und vor dem Einbringen in das bereits mit Öl gefüllte Versuchsgefäß mit dem Versuchsöl durchtränkt. Sie wurden locker in das Versuchsgefäß eingelegt. Erst nach völliger Luftabsättigung wurde die Druckelektrode aufgesetzt. Für die Versuche bei schichtenparalleler Beanspruchung wur-

*) Professor Dr.-Ing. R. Strigel ist Direktor des Hochspannungsinstitutes der TU Berlin und Dr.-Ing. H. Winkelkemper Oberingenieur an diesem Institut.

1) In diesem Bericht sind Ergebnisse mehrerer Diplomarbeiten verwertet, die im Hochspannungsinstitut der Technischen Universität Berlin durchgeführt worden sind. Die Bearbeiter dieser Diplomaufgaben (in zeitlicher Reihenfolge der Bearbeitung) sind: B. Verch, W. Stockdreher, D. Lehmann, M. Koopmann, W. Hetzer, J. Rosenlöcher und J. Jeske.

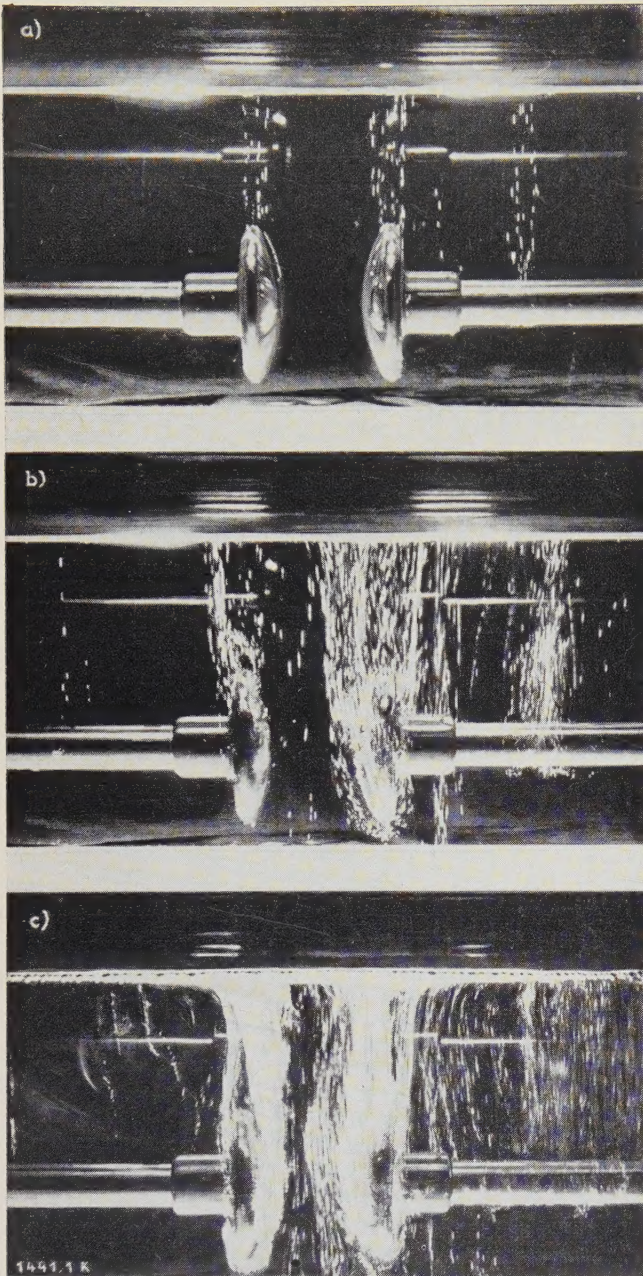


Bild 1. Blasenbildung in stark luftübersättigtem Öl bei Beanspruchung durch 50-Hz-Wechselspannung (nach B. Verch).

Elektroden: VDE-Kalotten mit 25 mm Abstand, linke Elektrode geerdet, Übersättigung durch Entlastung von Absättigungsdruck 4,3 atü auf Atmosphärendruck

- | | |
|-------------------------------------|--|
| a) $U_{\text{eff}} = 30 \text{ kV}$ | } Der Durchschlag trat bei 130 kV ein. |
| b) $U_{\text{eff}} = 70 \text{ kV}$ | |
| c) $U_{\text{eff}} = 95 \text{ kV}$ | |

den Papierstreifen von verschiedener Breite, die mit Hilfe einer Schablone exakt geschnitten waren, zu Paketen von 100 mm × 100 mm Größe in einem Hartpapierrahmen zusammengespant und zwischen die Elektroden eingesetzt. Der Preßdruck konnte durch entsprechende Spannung des Rahmens verändert werden. Durch umfangreiche Vorversuche wurde sichergestellt, daß bei der Luftabsättigung des Öles auch das Öl im Papier abgesättigt war.

Bei den Versuchen an reinen Ölstrecken wurde jeder Meßpunkt als Mittelwert aus jeweils 5 bis 6 Messungen ermittelt. In den Diagrammen für die Versuche mit dem Misch-Dielektrikum Öl-Papier ist jeder einzelne Meßwert eingetragen.

Das VDE-Isoliervermögen des Versuchsöles wurde vor jedem Untersuchungsabschnitt an einer dem Prüfgefäß entnommenen Probe gemessen und zwischen den Versuchen

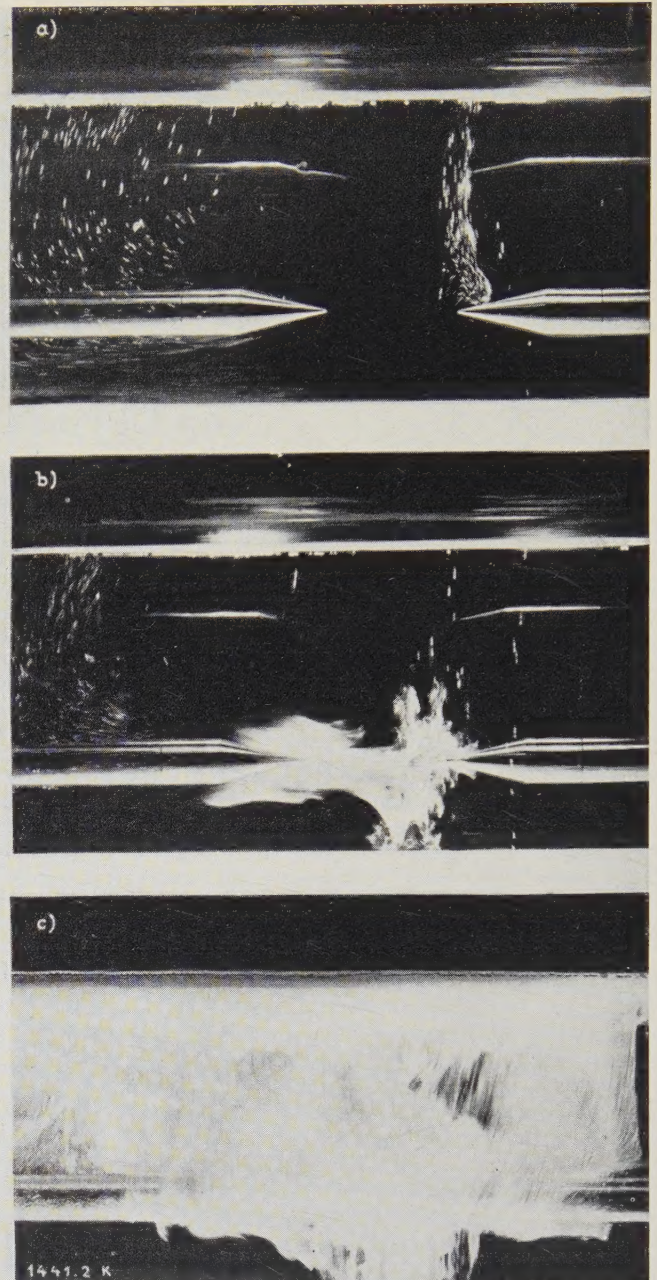


Bild 2. Blasenbildung in stark luftübersättigtem Öl bei Beanspruchung durch 50-Hz-Wechselspannung (nach B. Verch).

Elektroden: Spitze-Spitze mit 40 mm Abstand, Spitzenwinkel 20°, Schaftdurchmesser 10 mm, linke Elektrode geerdet, Übersättigung durch Entlastung von Absättigungsdruck 4,4 atü auf Atmosphärendruck

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| a) $U_{\text{eff}} = 45 \text{ kV}$ | } Der Durchschlag trat bei 75 kV ein |
| b) $U_{\text{eff}} = 53 \text{ kV}$ | |
| c) $U_{\text{eff}} = 70 \text{ kV}$ | |

ständig kontrolliert. Wenn sich eine Verminderung der Festigkeit um mehr als 10 % ergab, wurde neues Öl verwendet.

Die Versuche an reinen Ölstrecken

Kugelelektroden (VDE-Kalotten)

In Bild 5 ist für die Elektrodenabstände 2,5, 5,0 und 7,5 mm die Durchschlagsspannung des mit Luft abgesättigten Öles in Abhängigkeit vom Druck aufgetragen. Ferner ist in Bild 5 ihr Abfall bei Entlastung auf Atmosphärendruck und schließlich noch die Spannung angegeben, bei der nach Druckentlastung Gasblasen im Öl auftreten. Die Durchschlagsspannung des abgesättigten Öles steigt im untersuchten Druckbereich etwa geradlinig an und liegt bei einem Druck von 3 atü je nach Schlagweite um etwa 10 bis 20 % höher als bei Atmosphärendruck. Bei Entlastung fällt die

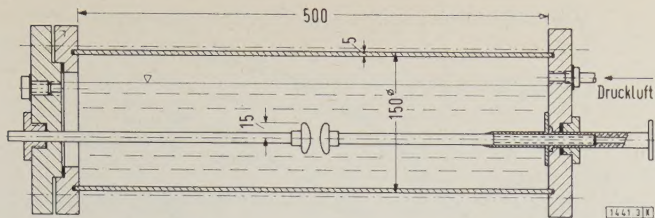


Bild 3. Prüfgefäß für die Versuche an reinen Ölstrecken.

Durchschlagsspannung sehr stark ab auf Werte, die erheblich unter der Durchschlagsspannung des bei Atmosphärendruck abgesättigten Oles liegen, und strebt offensichtlich einem unteren Grenzwert zu. Dieser Abfall der Durchschlagswerte ist auf die einsetzende Gasblasenentwicklung zurückzuführen, die mit zunehmendem Absättigungsdruck nach der Entlastung stürmischer wird. Der Grenzwert, dem die Durchschlagsspannung zustrebt, entspricht einem VDE-Isoliervermögen von etwa 25 kV. Er stimmt praktisch mit dem Wert überein, den man bei künstlich stark durchschäumtem Öl erhält.

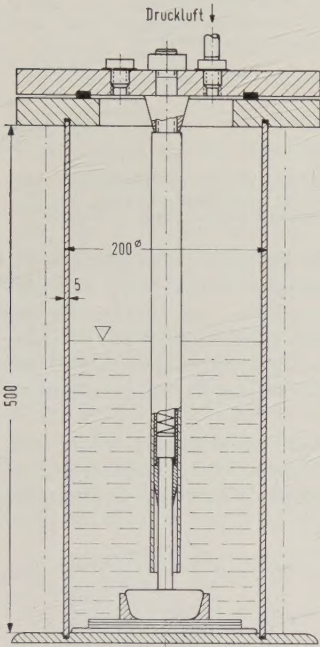


Bild 4. Prüfgefäß für die Versuche am Misch-Dielektrikum Öl-Papier.

eine Festigkeit, die je nach Elektrodenabstand um 25 bis 30% geringer als die Festigkeit des bei Atmosphärendruck abgesättigten Oles ist.

Die bisher beschriebenen Versuche wurden mit verhältnismäßig gutem Öl durchgeführt, das ein VDE-Isoliervermögen (Durchschlagsspannung zwischen VDE-Kugelkalotten bei 2,5 mm Abstand) von etwa 65 kV hatte. Bild 7 gibt demgegenüber Versuche wieder, die in schlechterem Öl (VDE-Isoliervermögen etwa 33 kV) vorgenommen worden sind. Die relative Absenkung der Durchschlagsspannung des

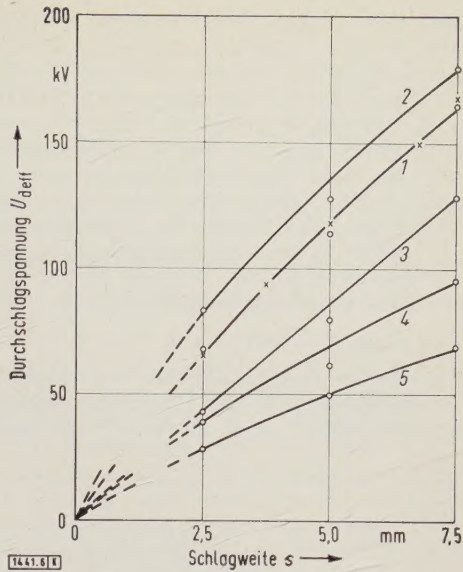


Bild 6. Durchschlagsspannung zwischen VDE-Kalotten mit den Werten aus Bild 5, dargestellt in Abhängigkeit von der Schlagweite s (nach J. Jeske).

- 1 Öl abgesättigt bei Atmosphärendruck; die durch ein Kreuz (X) gekennzeichneten Meßpunkte wurden in einer zur Kontrolle durchgeführten Meßreihe ermittelt
 - 2 Öl abgesättigt bei 3,5 atü
 - 3 0,5 atü
 - 4 1,0 atü
 - 5 3,5 atü
- Öl übersättigt durch Entlastung vom Absättigungsdruck auf Atmosphärendruck

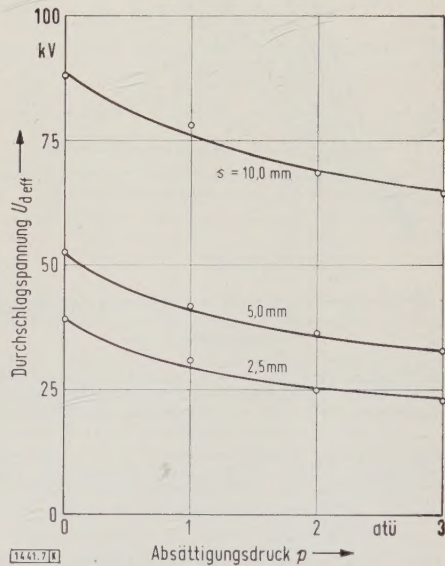


Bild 7. Durchschlag-Wechselspannung zwischen VDE-Kalotten in schlechtem Öl (VDE-Isoliervermögen etwa 33 kV) bei Übersättigung durch Druckentlastung vom Absättigungsdruck p auf Atmosphärendruck für verschiedene Schlagweiten s (nach J. Jeske).

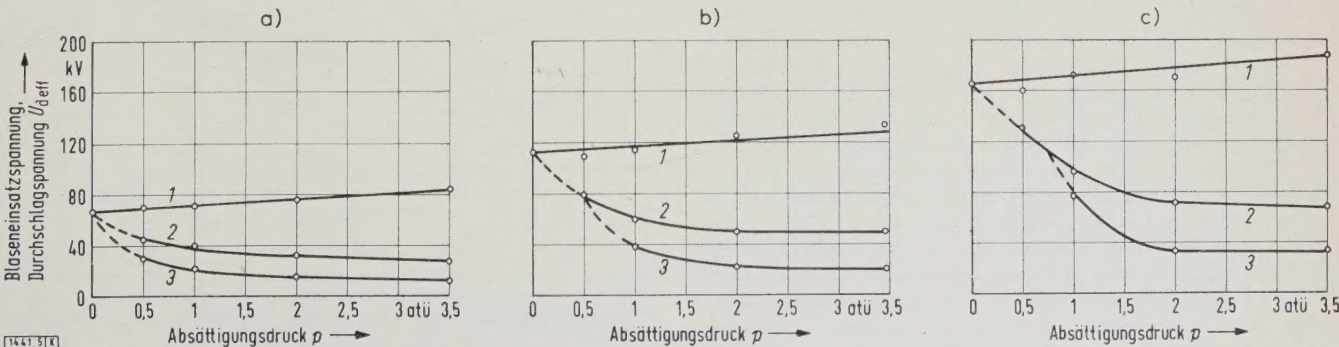


Bild 5. Durchschlag-Wechselspannung zwischen VDE-Kalotten in abgesättigtem Öl (Kurven 1) und in übersättigtem Öl nach Druckentlastung auf Atmosphärendruck (Kurven 2) in Abhängigkeit vom Absättigungsdruck p bei verschiedenen Schlagweiten s (nach J. Jeske). Die Kurven 3 zeigen die Abhängigkeit der Blasenansatzspannung für das übersättigte Öl. VDE-Isoliervermögen des Oles vor dem Einfüllen in das Prüfgefäß etwa 65 kV.

- a) $s = 2,5$ mm,
- b) $s = 5,0$ mm,
- c) $s = 7,5$ mm.

gasübersättigten Öles nach der Entlastung ist geringer als im besseren Öl. Der Grenzwert, dem die Festigkeit nach der Entlastung zustrebt, liegt nur wenig unter den Werten des guten Öles. Es hat den Anschein, als ob starke Blasenbildung das VDE-Isoliervermögen des Öles, unabhängig vom Ausgangswert, auf das bereits erwähnte Isoliervermögen von etwa 25 kV herabsetzt. Die Streuung der Meßwerte lag für beide Ölsorten im abgesättigten Zustand im Bereich $\pm 13\%$ des Mittelwertes. Bei Übersättigung war sie geringer, besonders bei starker Bläschenbildung, und betrug bei der hohen Übersättigung, wie sie dem Absättigungsdruck von 3,5 atü entspricht, nur noch $\pm 2\%$.

Spitze-Platte-Elektroden

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Kugelelektroden ist die Druckabhängigkeit der Durchschlagspannung bei Spitze-Platte-Elektroden, also im stark ungleichförmigen

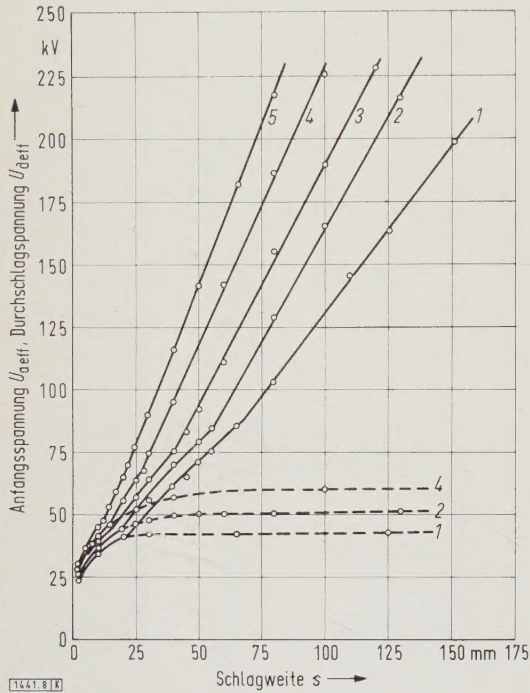


Bild 8. Durchschlagspannung (—) und Anfangsspannung (---) zwischen Spitze-Platte-Elektroden in luftgesättigtem Öl in Abhängigkeit von der Schlagweite s bei verschiedenem Absättigungsdruck p (nach J. Jeske).

Spitzenelektrode Messing, Schaftdurchmesser 10 mm, Spitzenwinkel 15° , Krümmungshalbmesser 0,3 mm, VDE-Isoliervermögen des Öles vor dem Einfüllen in das Versuchsgefäß etwa 60 kV.

- | | | |
|---|------------------|-------------------|
| 1 | Atmosphärendruck | Absättigungsdruck |
| 2 | 0,5 atü | |
| 3 | 1,0 atü | |
| 4 | 2,0 atü | |
| 5 | 3,5 atü | |

Feld, bei luftgesättigtem Öl erheblich. In Bild 8 ist für verschiedene Werte des Absättigungsdruckes die Durchschlagspannung in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand aufgetragen. Bemerkenswert ist zunächst, daß der Kurvenverlauf in dieser Darstellung die gleichen charakteristischen Merkmale aufweist, wie sie für den Luftdurchschlag bei dieser Elektrodenanordnung festgestellt worden sind. Die Kurven beginnen mit starker Krümmung, entsprechend der Anfangsspannung der Elektrodenanordnung. Bei der Schlagweite, bei der sich die Durchschlagspannung von der Anfangsspannung ablöst, schließt sich ein zweiter bogenartiger Kurvenast mit weniger starker Krümmung an, der bei noch größeren Schlagweiten mit einem weiteren Knick in einen geradlinigen Anstieg übergeht. Dieser zweite Knick ist gekennzeichnet durch Einsatz stärkerer Entladungen an der Spitzenelektrode. Die eingetragenen Meßpunkte sind Mittelwerte aus jeweils 5 bis 6 Messungen. Während in den bogenförmigen Kurvenästen Streuungen von $\pm 7,5\%$ auftreten, ist im geradlinigen Teil der Durchschlagskurve

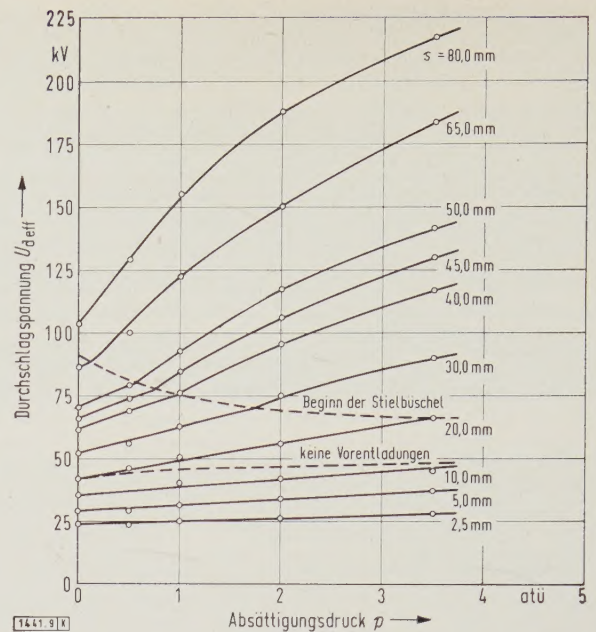


Bild 9. Durchschlagspannung zwischen Spitze-Platte-Elektroden mit den Werten aus Bild 8, dargestellt in Abhängigkeit vom Absättigungsdruck p für verschiedene Schlagweiten s (nach J. Jeske).

die Streuung sehr gering. Sie beträgt in diesem Gebiet höchstens $\pm 2\%$. Mit zunehmendem Druck wird der Anstieg des geradlinigen Teiles steiler; so beträgt er bei 0 atü 13,5 kV/cm und bei 3,5 atü 25,8 kV/cm. Das VDE-Isoliervermögen des verwendeten Öles war dabei 60 kV. Der mittlere bogenartige Kurventeil schrumpft mit steigendem Druck immer mehr zusammen.

Noch deutlicher werden diese Verhältnisse, wenn man, wie in Bild 9, die Durchschlagspannung abhängig vom Absättigungsdruck für verschiedene Werte der Schlagweite

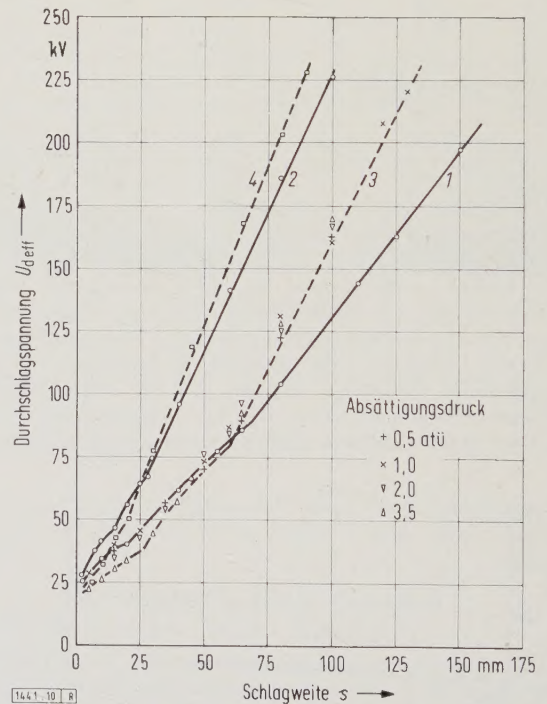


Bild 10. Einfluß der Luftübersättigung in Öl auf die Durchschlagspannung zwischen Spitze-Platte-Elektroden (nach J. Jeske). Elektrodenform und Ölbeschaffenheit wie bei den Versuchen zu Bild 8.

- 1 Durchschlagspannung des Öles im Sättigungszustand bei Atmosphärendruck
- 2 Durchschlagspannung des Öles im Sättigungszustand bei 2 atü
- 3 kleinste Werte der Durchschlagspannung des Öles im Zustand der Übersättigung durch Druckentlastung von verschiedenem Absättigungsdruck auf Atmosphärendruck
- 4 Durchschlagspannung nach Druckentlastung vom Absättigungsdruck 3,5 atü auf 2,0 atü

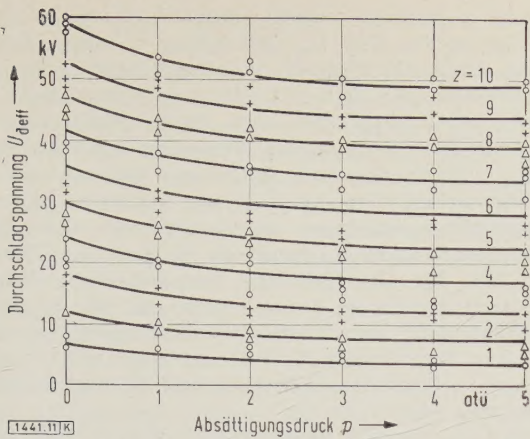


Bild 11. Durchschlagsspannung zwischen ebenen Elektroden mit Öl-Papier-Dielektrikum, das mit Luft unter verschiedenem Druck p abgesättigt war, nach der Druckentlastung auf Atmosphärendruck bei Beanspruchung senkrecht zu den Schichten (J. Rosenlöcher).

Aufgesetzte Rogowski-Elektrode mit Platte von 60 mm Dmr., Papierdicke 0,1 mm, VDE-Isoliervermögen des Öles etwa 40 kV.

aufträgt. Solange der Durchschlag nicht durch vorherige Vorentladungen an der Spitze eingeleitet wird, solange also Anfangs- und Durchschlagsspannung zusammenfallen, hängt die Durchschlagsspannung nur wenig vom Druck ab, wie dies auch im Kugelfeld (Bild 5) beobachtet worden ist. Im Bereich des zweiten Bogenastes ist der Einfluß des Druckes stärker und nimmt im geradlinigen Ast erheblich zu.

Die Verhältnisse bei Druckentlastung sind aus Bild 10 ersichtlich. Im Gegensatz zu den Messungen mit den VDE-Kalotten liegen die Werte für ein Öl, das vom Druck entlastet ist, für verschiedene Absättigungsdrücke dicht beieinander. Im unteren Bereich, in dem Anfangs- und Durchschlagsspannung noch zusammenfallen, liegen sie, ebenso wie im Kalottenfeld, unterhalb der Werte des bei Atmosphärendruck abgesättigten Öles. Im mittleren Bereich

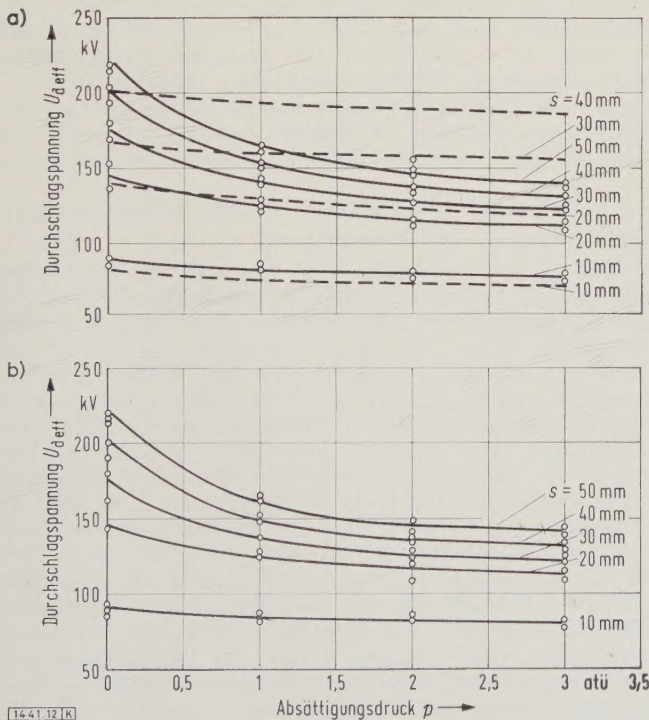


Bild 12. Durchschlagsspannung zwischen ebenen Elektroden mit luftübersättigtem Öl-Papier-Dielektrikum (—) bei schichtenparalleler Beanspruchung für verschiedene Schlagweiten s und zwei verschiedene Werte der Papierpressung (nach J. Rosenlöcher).

Durchschlagsspannung der reinen Ölrecken mit der gleichen Elektrodenanordnung bei den entsprechenden Schlagweiten (---). VDE-Isoliervermögen des Öles etwa 25 kV. Elektrodenanordnung und Papier wie in den Versuchen zu Bild 11.

a) Preßdruck 0,525 kp/cm², b) Preßdruck 2,63 kp/cm².

fallen sie etwa mit letzteren zusammen und liegen im geradlinigen Teil überraschenderweise sogar darüber. Das Öl hat im druckentlasteten Zustand etwa die gleiche Festigkeit wie das bei 0,5 atü abgesättigte Öl. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei Versuchen, die nach Entlastung von 3,5 auf 2 atü vorgenommen worden sind. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Bild 10 dargestellt. Auch hier liegen die Durchschlagswerte für das druckentlastete, luftübersättigte Öl im geradlinigen Kurvenast über den Werten, die für das bei 2 atü abgesättigte Öl gemessen worden sind.

Versuche am Misch-Dielektrikum Öl-Papier

Beanspruchung senkrecht zur Schicht

In Bild 11 ist entsprechend der Darstellung von Bild 5 für verschiedene Zahlen z von Papierlagen die Durchschlagsspannung in Abhängigkeit vom Sättigungsdruck nach Entlastung auf Atmosphärendruck dargestellt. Für jede Versuchseinstellung wurden 2 bis 3 Messungen vorgenommen. Jeder Meßpunkt ist, wie bereits erwähnt wurde, im Kurvenblatt eingetragen. Mit dieser an sich geringen Zahl von Meßpunkten, deren Ermittlung recht zeitraubend ist, konnte man sich begnügen, da die Streuung nicht sehr erheblich ist und der Kurvenverlauf wegen der Parameterdarstellung sich leicht festlegen läßt. Auch in diesem Fall zeigt sich, ähnlich wie bei den Kalottenversuchen in reinem Öl, daß die Durchschlagsspannung der entlasteten Öl-Papier-Strecke

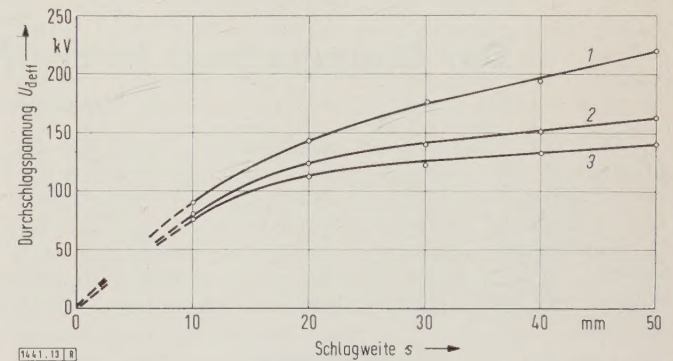


Bild 13. Mittelwerte aus Bild 12 a und 12 b, dargestellt in Abhängigkeit von der Schlagweite s für verschiedene Werte des Absättigungsdruckes (J. Rosenlöcher).

- 1 Durchschlagsspannung des Öl-Papier-Dielektrikums im Sättigungszustand bei Atmosphärendruck
- 2 Durchschlagsspannung nach Druckentlastung vom Absättigungsdruck 1 atü auf Atmosphärendruck
- 3 wie 2, jedoch für Absättigungsdruck 3 atü

mit wachsendem Absättigungsdruck zunächst schnell abnimmt, sich dann aber einem Grenzwert nähert. Die prozentuale Absenkung ist stark abhängig von der Papierlagenzahl. So beträgt sie bei einer Lage etwa 40 %, bei 10 Lagen dagegen nur noch etwa 16 %. Maßgebend für die Absenkung dürfte Bläschenbildung zwischen den Papierlagen sein, die sich naturgemäß bei wenigen Lagen, d.h. kleineren Elektrodenabständen, stärker auswirkt.

Beanspruchung parallel zur Schicht

Die Versuche wurden bei Elektrodenabständen von 1 bis 5 cm durchgeführt. Um mit der gleichen Versuchseinrichtung auszukommen, mußte Öl mit einem geringeren VDE-Isoliervermögen verwendet werden. Die Pressung der Papierpakete senkrecht zu den Schichten wurde zwischen den Drücken von 0,5 und 2,6 kp/cm² verändert. Für diese beiden Grenzzustände sind die Meßwerte in Bild 12 eingetragen. Sie lassen erkennen, daß die Flächenpressung ohne Einfluß ist. Die Kurve für eine Schlagweite von 1 cm liegt auffallend tief. In der Darstellung von Bild 13, bei der die Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Schlagweite für die verschiedenen Absättigungsdrücke im entlasteten Zustand aufgetragen ist, fügen sich jedoch die Meßwerte für diese Schlagweite gut in das Gesamtbild der Messungen ein. Die Absenkung der Durchschlagsspannung

ist bei 1 cm Paketbreite sehr gering, bei größeren Breiten, d. h. größeren Schlagweiten, aber erheblich. In Bild 12a sind außerdem die Durchschlagsspannungen für die reinen Ölstrecken mit den gleichen Elektrodenabständen bei einem Öl gleichen VDE-Isoliervermögens (als gestrichelte Kurven) aufgetragen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus den Versuchen an den Papierpaketen zeigen sie auch für größere Schlagweiten nur eine geringe Absenkung bei Entlastung. Dieses Verhalten ist für schlechtes Öl nach den Versuchen zu Bild 7 charakteristisch.

Wenn auch schon die festgestellte Unabhängigkeit der Versuchsergebnisse vom Anpreßdruck darauf hindeutet, daß die Spaltbreite innerhalb des Papierpaketes nur von geringem Einfluß auf die Durchschlagsfestigkeit sein kann, so ist diese Frage dennoch besonders untersucht worden. Zu diesem Zweck wurden in das Papierpaket einzelne geteilte Papierstreifen eingelegt, und zwar in verschiedener Lagenzahl, um auf diese Weise definierte, verschieden dicke Spalte zu erreichen. Die Maßnahme hat keinerlei Änderung der Meßergebnisse gebracht, auch waren diese vergrößerten Spalte bei den aufgetretenen Durchschlägen nicht bevorzugt.

Zusammenfassung

Die in dem Aufsatz beschriebenen Versuche über den Einfluß der Gasübersättigung in Öl auf die Durchschlagsspannung haben gezeigt, daß die in der Einleitung ausge-

sprochene Vermutung zutrifft, wonach infolge von Gasübersättigung des Öles in elektrischen Geräten (mit Gaspolstern) die Durchschlagsfestigkeit beeinflusst werden kann. Im ungleichförmigen Feld tritt, sofern der Durchschlag durch Vorentladungen eingeleitet wird, keine Minderung, sondern sogar eine geringfügige Erhöhung der Durchschlagsspannung infolge der nach Entlastung einsetzenden Gasblasenbildung auf. Dagegen kann die Durchschlagsspannung bei Elektrodenanordnungen, bei denen keine Vorentladungen vor dem Durchschlag entstehen, je nach der Ölbeschaffenheit und der Druckdifferenz bei Entlastung erheblich herabgesetzt werden. Es hat den Anschein, als ob bei starker Blasenbildung im Öl das VDE-Isoliervermögen unabhängig von der Ölbeschaffenheit auf etwa 25 kV gesenkt wird. Auch bei Isolieranordnungen mit Öl und Papier ergibt sich eine Minderung der Durchschlagsfestigkeit, die bei Beanspruchung parallel zu den Papierschichten und Schlagweiten über 1 cm besonders stark ausgeprägt ist.

Schrifttum

- [1] Luther, H., u. Röttger, N.: Zur Druckabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von Kohlenwasserstoffen, ETZ-A Bd. 78 (1957) S. 462-464.
- [2] Buchholz, H. H.: Einfluß des Gasgehaltes auf das dielektrische Verhalten von Isolierölen, ETZ-A Bd. 75 (1954) S. 763-768 u. Diss. TH Braunschweig 1951.
- [3] Bernatzky, W.: Über den Einfluß des bei der Hydrierung von Kohlenoxyd an Eisenkatalysatoren gebildeten Hartparaffins auf die Synthese, Diss. TH Braunschweig 1948.
- [4] Wörner, Th.: Über die Gasfestigkeit von Isolierölen im elektrischen Feld, ETZ-A Bd. 72 (1951) S. 656-658.

Der Digitalrechner in der Netzplanung und -beratung

Von Hans Edelmann, Erlangen*)

DK 681.14-523.8 : 621.316.11

Durch die Einführung des Digitalrechners bietet sich die Möglichkeit, die Probleme rechnerischen, organisatorischen und logischen Charakters mit immer größerer Vollkommenheit zu lösen und die Programme zur Lösung dieser Probleme in mannigfacher Weise zu kombinieren. Infolge der vielfartigen Verwendbarkeit digitaler Rechenanlagen kann eine weitgehende Vollautomatisierung des Rechengangs erreicht werden.

Grundsätzliches

Zu einer Zeit, in der nicht einmal alle Stellen, die sich mit Netzplanung und -beratung zu befassen haben, ein Netzmodell haben, wird man sich fragen, warum man nun auch den Digitalrechner für die Netzplanung verwendet oder diesen vielleicht eines Tages hierfür nur noch verwenden wird. Hierbei muß allerdings vorausgeschickt werden, daß sich diese Ausführungen hauptsächlich auf größere Betriebe beziehen, die sich solche Anlagen leisten können. Jedoch auch kleineren Betrieben bleibt die Möglichkeit, sich an ein Rechenzentrum zu wenden. Was sind nun die charakteristischen Eigenschaften des Digitalrechners?

Der Digitalrechner [1] hat sich in den letzten Jahren ein immer größeres Betätigungsfeld erobert und ist dabei auch in Gebiete eingedrungen, für die er den herkömmlichen Anschauungen gemäß gar nicht vorgesehen war. Denkt man doch dabei zunächst nur an eine analytische rein numerische Verwendung auf Grund der vier arithmetischen Grundoperationen. Aber schon recht früh entwickelte sich parallel hierzu der bedeutsame Zweig der hauptsächlich kaufmännischen bzw. verwaltungstechnischen Datenverarbeitung, deren Grundaufgaben im wesentlichen in der Sortierung und in statistischen Auswertungen bestehen. Arithmetische Operationen treten in der Datenverarbeitung zwar auch auf, haben hier aber nicht mehr die Hauptbedeutung.

Ein anderes Anwendungsbeispiel, bei dem jedoch arithmetische Operationen nicht mehr vorkommen, ist die Sprachenübersetzung. Eine der Sprachenübersetzung verwandte Aufgabe, nun wieder mit arithmetischer Anwen-

dung, ist die Formelübersetzung (im Sinne von z. B. FORTRAN [2] oder ALGOL [3]). Das Charakteristische am Digitalrechner ist nun — und hier unterscheidet er sich vom Analogrechner —, daß jeder moderne Digitalrechner zu diesen so verschiedenartigen Aufgaben befähigt ist, ohne daß er hierfür besonderer Zusätze benötigt. Es gibt zwar Rechner, die für vorwiegend arithmetische Operationen besser geeignet sind und in diesem Bereich wirtschaftlicher arbeiten, und es gibt auch solche, die in der Datenverschiebung oder in der Sprachenübersetzung günstiger arbeiten, aber jeder dieser Typen läßt sich grundsätzlich auch für die anderen Aufgaben verwenden. Zunächst soll jedoch im folgenden die historische Entwicklung betrachtet werden.

Bisher benutzte Hilfsmittel in der Netzplanung

Hilfsmittel der Rechnung

Der Rechenschieber ist und wird auch noch lange Zeit das am weitesten verbreitete Rechenhilfsmittel in der Technik bleiben. Ein Rechenschieber kann überallhin mitgenommen werden, der Anschaffungspreis ist gering, das Ergebnis kann fast unmittelbar abgelesen werden, wichtige Funktionen (trigometrische, logarithmische und Exponentialfunktionen) sind in Form von Skalen eingearbeitet. Das Aufschlagen von Tabellen wird damit erspart. Die Beschränkung der Genauigkeit ist in den meisten Fällen unerheblich; ist doch die erreichte Genauigkeit mehr als eine Größenordnung besser als die der meisten unmittelbar anzeigenden Meßgeräte. Erst bei umfangreichen Rechnungen und bei Rechnungen, in denen Differenzen annähernd gleich großer Zahlen auftreten, kann die beschränkte Genauigkeit des Rechenschiebers das Ergebnis so fälschen, daß dieses unbrauchbar wird. Ähnliche vorteilhafte Eigenschaften wie der Rechenschieber haben auch graphische Verfahren, vorbereitete Diagramme (Nomogramme), sofern die Genauigkeit dieser Hilfsmittel ausreichend ist.

Reicht die Genauigkeit nicht aus, so greift man in der Regel zu Tischrechenmaschinen. Handkurbelmaschinen sind in der Regel 10- bis 30mal so teuer wie ein Rechenschieber, halb- oder vollautomatische elektrische Tischrechenmaschinen nochmals etwa 5- bis 10mal so teuer wie die Handkurbelmaschinen. Die zuletzt Genannten haben

*) Dr.-Ing. H. Edelmann ist Privatdozent der TH Darmstadt und Mitarbeiter der Siemens-Schuckertwerke in Erlangen.

Die Arbeit enthält die Antrittsvorlesung des Verfassers, die er am 12. Mai 1961 in der Fakultät für Elektrotechnik der TH Darmstadt gehalten hat.

in der Regel eine Stellenkapazität von 10×10 Stellen maximal, und es kommt äußerst selten vor, daß diese Genauigkeit nicht ausreicht¹⁾. Beispiele für die Anwendung solcher Rechenmaschinen sind die Berechnung von Erderpotentialen, die Berechnung von (komplexen) Eigenfrequenzen für die Schwingungen des Polrades zur Beurteilung der statischen Stabilität von Synchronmaschinen in einem Verbundnetz sowie die Berechnung von Koeffizienten einer Verlustformel für ein System von Kraftwerken in einem Verbundnetz. Auch in der Schritt-für-Schritt-Rechnung zur Integration des Systems von (nichtlinearen) Differentialgleichungen für die Polradwinkel der Synchronmaschinen in einem Verbundnetz verwendet man gern Tischrechenmaschinen aus Gründen der Rechensicherheit, obwohl hier Rechenschiebegerauigkeit ausreichend wäre.

Modellmäßige Nachbildungen, Netzmodelle, Analogrechner

Mit Hilfe des Rechenschiebers oder der Tischrechenmaschine lassen sich nur kleine Netze wirtschaftlich durchrechnen. Bei größeren Netzen und mehrfachen Vermaschungen ist eine Durchrechnung mit diesen Hilfsmitteln wirtschaftlich nicht mehr tragbar. Man ging daher schon bald zu modellmäßigen Nachbildungen über. Die ersten Netzmodelle wurden in den zwanziger Jahren in den USA und bald darauf auch in Frankreich, Rußland und Deutschland gebaut. Hier soll jedoch nicht näher auf die verschiedenen Möglichkeiten der Nachbildung stationärer Vorgänge in elektrischen Verbundnetzen eingegangen werden. Je nach dem Anwendungszweck und nach den zur Verfügung stehenden Mitteln gibt es verschiedene Optimallösungen. Abgesehen von einigen Sonderfällen, wie das Microréseaux der EdF²⁾, beruht die modellmäßige Darstellung in der Regel auf der einphasigen Nachbildung des Originalnetzes, oder — etwas genauer ausgedrückt — auf der Darstellung des sogenannten Mitsystemnetzes (in der Sprache der symmetrischen Komponenten). Unsymmetrieraufgaben werden dann nach der Methode der symmetrischen Komponenten oder der $\alpha\beta 0$ -Komponenten erledigt [4, 5]. Diese Darstellungsweise ist hinsichtlich der benötigten Schaltelemente günstiger als die unmittelbare dreiphasige Darstellung.

Mit Hilfe eines solchen Netzmodells ist man in der Lage, auch komplizierte und umfangreiche Netze wirtschaftlich darzustellen und wichtige — gemessen an ihrem Rechenverlauf — schwierige Probleme zu lösen. Hierzu gehören Fragen nach den Kurzschlußströmen, Strom- und Leistungsflüssen, Spannungsverteilungen sowie Anregeströmen von Relais in Unsymmetriefällen. Auf indirektem Wege unter Zuhilfenahme von Tischrechenmaschinen lassen sich darüber hinaus auch Probleme der dynamischen und statischen Stabilität von Synchrongeneratoren in Verbundnetzen hiermit bearbeiten. Aber bereits die Ermittlung der komplexen Eigenfrequenzen zur Beurteilung der statischen Stabilität, z. B. nach *Hessenberg*, wird für größere Netze so umfangreich, daß eine wirtschaftlich tragbare Durchrechnung mit Hilfe der Tischrechenmaschine nicht mehr gerechtfertigt ist. Ähnliche umfangreiche Rechnungen ergeben sich bei der Bestimmung der Verlustkoeffizienten aus gemessenen Werten der Impedanzmatrix des Verbundnetzes. Es soll auch nicht verkannt werden, daß das Netzmodell gerade für den lernenden Ingenieur ein nützliches Hilfsmittel ist, um sich damit ein Gefühl für gewisse funktionale Abhängigkeiten der Ströme und Spannungen in Energieübertragungsnetzen zu verschaffen.

Ein Netzmodell kann man auch dazu benutzen, um Fragen der dynamischen Stabilität der Synchronmaschinen in einem Verbundnetz zu untersuchen (Kurzunterbrechungen). Da auch die Schritt-für-Schritt-Rechnung

zwar in den meisten Fällen noch wirtschaftlich tragbar ist, aber immer wieder dazu zwingt, die Anzahl der zu untersuchenden Fälle einzuschränken, wurde auch hier versucht, durch Zusätze zu dem vorhandenen Netzmodell — auf der Basis der Analogrechenteknik — die Schwingkurven für die Polräder der Synchronmaschinen auf dem Schirm einer Oszillographenröhre darzustellen. In der Genauigkeit zufriedenstellende Einrichtungen, die in der Lage sind, alle nur denkbaren Möglichkeiten von unsymmetrischen Fehlern im Netz zu berücksichtigen, sind z. B. die Synchronmaschinen-Simulatoren der Siemens-Schuckertwerke (SSW).

Auch nichtstationäre Vorgänge lassen sich mit Hilfe von Netzmodellen darstellen. Hierbei ist zu beachten, daß man die vorkommenden Leitungen nun nicht mehr durch einfache \overline{II} - (bzw. \overline{I} -)Glieder, sondern durch möglichst viele solcher Glieder nachzubilden hat, um der homogenen Leitung möglichst nahezukommen. Auch muß der Frequenzgang der in diesen Gliedern verwendeten Drosselspulen bis zu hinreichend hohen Frequenzen mit denen der nachzubildenden Leitung übereinstimmen. Wegen der Schwierigkeit, Drosselspulen mit dem gewünschten Frequenzgang zu bauen, hat man auch versucht, Analogrechner für diese Zwecke einzusetzen (ANACOM der Westinghouse, Netzanalysator der AEG, Schwingungsmodell der SSW).

Zur Ermittlung der Kraftwerksleistungen bei minimalen Gesamt-Brennstoffkosten — der optimalen Lastaufteilung — benutzt man bereits seit längerer Zeit Analoggeräte. Diese Geräte lösen die im allgemeinen nichtlinearen Gleichungen, die sich als notwendige Bedingungen für das gesuchte Minimum ergeben. Die Lösung kann in wenigen Sekunden abgelesen werden. Während solche Geräte in den USA schon seit längerer Zeit bei zahlreichen Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen in Betrieb sind, ist ein entsprechendes Gerät SIELOMAT [6] der SSW erst vor einigen Monaten als erstes dieser Art in Europa in Betrieb gegangen. Da diese Analoggeräte in ihrer Einstellgeschwindigkeit hinreichend schnell sind, kann man sie mit einigen Zusätzen auch zur automatischen Steuerung der Kraftwerke in Verbindung mit der Frequenzregelung betreiben. Entsprechende Digital-Geräte sind z. Z. noch zu kostspielig, insbesondere für europäische Verhältnisse, sind aber in den USA bereits im Betrieb [26].

Digitalrechner

Es wurde dargelegt, daß es durch Einführung verschiedener Analogrechner gelang, eine Reihe von Problemen hauptsächlich analytischer Art in einer wirtschaftlich tragbaren Weise mit ausreichender Genauigkeit zu lösen. So groß der Fortschritt auf diesen Gebieten auch ist — waren doch einige dieser Probleme mit den bisherigen Hilfsmitteln praktisch unangreifbar —, so bleibt doch eine Tatsache noch unbefriedigend: Die gelösten Probleme sind im ganzen gesehen nur Teilprobleme, und bevor man eine Aufgabe auf dem Netzmodell oder Analogrechner realisiert, bedarf es einer doch teilweise recht langwierigen Vorbereitung mit Hilfe des Rechenschiebers oder der Tischrechenmaschine.

Dem universellen Charakter des Digitalrechners würde es daher entsprechen, wenn man versuchen würde, alle Arten von vorausgehenden Rechnungen, ebenso auch die nachfolgenden Rechnungen und darüber hinaus auch noch alle im folgenden auftretenden logischen Entscheidungen und weitere Dispositionen in den Rechner hineinzuverlegen. Ja, man ist dann sogar in der Lage, der Technik der Unterprogramme folgend, die verschiedenen Probleme zu kombinieren und in einem Zuge sämtliche bei einer Projektierung anfallenden Teilprobleme digital zu lösen. Hierbei erweist es sich als vorteilhaft, daß nicht nur Aufgaben, die eine Lösung von Gleichungen oder Differentialgleichungen erfordern, in ein solches Programm hineingenommen werden können, sondern auch Teilaufgaben von datenverarbeitendem Charakter, wie Sortierungen, statistische Auswertung, ferner Teilaufgaben mit Entscheidungskriterien (ist die gewählte Größe zulässig?) oder Teilaufgaben, deren Lösungen nur gestufte Werte (z. B. gewisse Normgrößen) zulassen.

1) Auch in solchen Fällen, in denen die Endergebnisse beispielsweise nur auf höchstens vier Stellen gefordert werden, ist es gelegentlich notwendig, die Zwischenrechnung mit höherer Stellenzahl, z. B. auf 10 Stellen, durchzuführen, als es das Endergebnis fordert, um schädliche Einflüsse von Rundungsfehlern in den Zwischenergebnissen auf das Endergebnis zu vermeiden.

2) EdF = Electricité de France.

Es muß immer wieder festgestellt werden, daß der Neuling auf dem Gebiet des Digitalrechnens anfangs glaubt, er müsse die zuletzt genannten Aufgabenstellungen aus der Programmierung ausklammern, weil er dies von den bisher benutzten analogen Hilfsmitteln so gewohnt war. Aber gerade der datenverarbeitende Charakter des Digitalrechners ist ausschlaggebend dafür, daß hier nicht nur gewisse Lücken im Ablauf einer Gesamtlösung eines Projektierungs- oder Entwicklungsproblems ausgefüllt werden, sondern darüber hinaus eine Möglichkeit gegeben ist, über die Unterprogrammtechnik einmal programmierte Lösungen von Teilaufgaben als Bausteine für übergeordnete Aufgaben zu verwenden. Dabei spart man einmal Zeit und Arbeitskraft, die man sonst mit monotoner Routinearbeit verschwendet, und man gewinnt außerdem an Rechensicherheit. Denn bei jeder Zwischenauswertung durch den Menschen ist die Möglichkeit von Fehlern gegeben.

Man muß also anstreben, daß die vom Kunden gegebenen Daten ohne Vorbehandlung in den Rechner eingegeben werden und die Gesamtaufgabe soweit durchgerechnet wird, daß die geforderten Ergebnisse am Ende der Rechnung zur Verfügung stehen, d. h. man strebt damit eine Vollautomatisierung an. Die Durchführung solcher Aufgaben kann dann in vielen Fällen auch von Hilfspersonen durchgeführt werden, die von den Lösungsmethoden und den Planungsprinzipien keine oder nur geringe Kenntnis haben müssen. Es muß allerdings gesagt werden, daß man heute von dem geschilderten Idealzustand noch weit entfernt ist. Tatsächlich werden insbesondere in Europa z. Z. vorwiegend nur solche Teilaufgaben gelöst, die mit Analogrechnern und den übrigen bisherigen Hilfsmitteln nicht befriedigend gelöst werden können.

Teilweise geht man auch schon dazu über, die augenblicklich noch den Analogrechnern vorbehaltenen Aufgaben, die ausschließlich analytischer Art sind, digital zu rechnen. Im übrigen schaltet sich immer noch der Mensch zur letzten Entscheidung ein [7 bis 22]. Hingegen ist man in den USA aber bereits dabei, sehr umfangreiche Programme für Gesamtplanungen aufzubauen [23]. Freilich können solche Großprogramme erst erstellt werden, wenn die Bausteine dazu vorhanden sind. Außerdem benötigt man hierzu schnellere Rechengeräte mit einer größeren Speicherkapazität. Es ist auch klar, daß diese Entwicklung eine gewisse Zeit benötigt, und daß die in Europa andersartigen Verhältnisse die Wahl eigener Wege bedingen.

Wie hat man sich ein solches Programm vorzustellen, und welche Aufgaben werden im einzelnen gelöst? Dies soll im folgenden skizziert werden. Gegeben sei ein Netz mit sämtlichen Ausbaudaten in den Kraftwerken, Umspann- und Schaltstationen und mit den Kenngrößen der Leitungen des Netzes. Ferner werden gewisse Prognosewerte benötigt, wie Leistungswachstum in den Verbraucherzentren, zukünftige Möglichkeiten für den Bezug preisgünstiger Energie, Preisentwicklungen der Energierohstoffe, Entwicklungen des Geldmarktes, Entwertung des Geldes usw. Auf der Grundlage dieser Daten werden sinnvolle Varianten der Ausbaustufen gebildet (nach Möglichkeit selbsttätig). Statistiken über Störungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten sind erforderlich, um festzustellen, ob der Betrieb mit den eingesetzten Mitteln möglich ist, und um die tatsächlichen Einnahmen und Ausgaben des Elektrizitätsversorgungs-Unternehmens für diese Varianten ermitteln zu können.

Aus der Vielzahl möglicher Lösungen sind diejenigen mit den günstigsten Kosten auszuwählen. Als Teilaufgaben fallen dabei neben meist trivialen Kosten die bereits genannten und in Form von Unterprogrammen vorliegenden Sonderaufgaben wie Lastflußrechnung, Spannungsverteilung im Netz, Ermittlung der Kurzschlußströme, Überspannungen bei Abschaltungen sowie der kritischen Schaltzeiten bei Kurzunterbrechungen (dynamische Stabilität) an. Gelegentlich muß in größeren Netzen auch die statische Stabilität nachgeprüft werden. Weitere Untersuchungen können sich auf den wirtschaftlich günstigsten Verbundbetrieb, den Einsatz von Speicherkraftwerken mit Zulauf oder ohne Zulauf (Pumpspeicherwerken) beziehen.

Dies soll nur eine grobe Skizzierung darstellen. Auf weitere Einzelheiten einzugehen, ist in dieser kurzen Darstellung nicht möglich. Ein so umfangreiches Programm kann nur in einer Gemeinschaftsarbeit einer Großfirma der Elektroindustrie mit einem oder mehreren Elektrizitätsversorgungs-Unternehmen im Lauf einiger Jahre entwickelt werden. Mindestens ein Dutzend Mitarbeiter müßten sich mit diesem Projekt beschäftigen.

Mathematische Fragen

Da in diesem Zusammenhang nicht geringe mathematische Probleme auftreten, wird es zweckmäßig sein, auch Mathematiker zur Programmierung heranzuziehen. Damit eine sinnvolle Verständigung zustande kommt, wird sich der Mathematiker in die technische Fragestellung und der Ingenieur in mathematische Methoden einarbeiten müssen. Ein wichtiges Grundlagengebiet für die analytischen Aufgaben der Netzplanung ist die Theorie elektrischer Netze³⁾. Sie umfaßt unter anderem Topologie der Netze, Algebraisierung der Topologie und lineare Algebra (Matrizenrechnung). Darüber hinaus benötigt man Kenntnisse über Iterationsverfahren zur Lösung linearer und nichtlinearer Aufgaben, numerische Behandlung von Extremalaufgaben, lineare und nichtlineare Programmierung, dynamische Programmierung, statistische Verfahren und Methoden zur numerischen Behandlung von gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen.

Die am Netzmodell und an Analogrechnern gewonnenen Erfahrungen wird man bei der Programmierung für den Digitalrechner nutzbringend anwenden können, insbesondere wird man auch beim Digitalrechner von der Theorie der Komponentensysteme Gebrauch machen und z. B. auch die Schwingkurvenberechnung mit Hilfe der schrittweisen Integration übernehmen. Darüber hinaus hat man beim Digitalrechner eine Reihe von Problemen, die beim Analogrechner nicht oder nicht in diesem Maße auftreten. Für das Auflösen von linearen oder nichtlinearen Gleichungen oder für die Integration von Differentialgleichungen müssen besondere numerische Verfahren angewendet werden. Schon das Auflösen von Gleichungssystemen erfordert ein eigenes numerisches Verfahren (Gauß-Jordan, Banachiewicz oder iterative Verfahren), während z. B. auf dem Netzmodell das Ermitteln der unbekannten Ströme bei gegebenen Spannungen kein Problem darstellt (die Stromverteilung stellt sich dort von selbst ein). Das gleiche gilt für zahllose andere Aufgaben, die bei analoger Nachbildung ganz und gar unproblematisch sind.

Ein anderes wichtiges Problem sind beim Digitalrechner die Fehler verschiedenster Art, nicht so sehr deshalb, weil der Digitalrechner an sich Fehler macht (der Mensch z. B. macht, statistisch gesehen, viel häufiger Fehler, die Fehler bei Analogrechnern sind im allgemeinen um mehrere Größenordnungen größer), als hauptsächlich deshalb, weil sie dort sehr deutlich sichtbar werden. Dafür hat man beim Digitalrechner auch in fast allen Fällen Mittel, die auftretenden Fehler zu beseitigen.

Läßt sich eine Größe nicht auf irgendeine Weise durch ganze Zahlen ausdrücken (z. B. auch durch einen Bruch zweier ganzer Zahlen), so ist man gezwungen, Näherungen einzuführen, z. B. Dezimalbrüche beschränkter Stellenzahl. Selbst bei höherer Stellenzahl (10- oder 20-stellig) ist dann eine Rundung aller Zwischen- und Endergebnisse nicht zu vermeiden. Bei umfangreichen Rechnungen kann es daher zu einer Akkumulation von Rundungsfehlern kommen und bei gewissen Verfahren (z. B. Differenzverfahren zur Auflösung von Differentialgleichungen) sogar zu Instabilitäten, welche die gewonnenen Ergebnisse völlig unbrauchbar werden lassen. In solchen Fällen muß man also darauf achten, daß die angewandten Verfahren stabil sind. Gelegentlich muß man auch mit mehrfacher Stellenzahl rechnen, was durch eine entsprechende Programmierung immer möglich

³⁾ Die Wichtigkeit dieses Gebietes in der modernen Elektrotechnik kann man z. B. auch daran erkennen, daß seit der letzten Studienreform „Theorie elektrischer Netze“ zu den wichtigsten Grundlagenfächern des 2. und 3. Studienjahres am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Mass.) zählt [24].

ist. Da sich grundsätzlich nur rationale Funktionen durch eine endliche Anzahl von Operationen der vier Grundrechnungsarten darstellen lassen, ein großer Teil der mit dem Digitalrechner zu lösenden Aufgaben aber auf Ergebnisse irrationaler Art führt, ist man gezwungen, sich mit Näherungen zu begnügen. Man kann dann zwar den Fehler beliebig klein machen, ein Restfehler bleibt in solchen Fällen immer. Solche Fehler, hervorgerufen durch ungenügende Genauigkeit im Näherungsverfahren, können beliebig klein gemacht werden, wenn man z.B. bei Reihen genügend Glieder berücksichtigt, bei Iterationsverfahren genügend Iterationsschritte wählt, bei Approximationsfunktionen hinreichend viel Parameter einführt (z.B. ein Approximationspolynom genügend hoher Ordnung ansetzt) oder bei Differentialgleichungen eine genügend kleine Schritt- oder Maschenweite einführt. Durch höheren Rechenaufwand können solche Verfahrensfehler immer so klein gemacht werden, daß der verbleibende Fehler nicht mehr stört. Fehlerabschätzungen geben die Möglichkeit, die Größe der Fehler hinreichend klein zu machen, ohne einen zu großen Rechenaufwand treiben zu müssen.

Bei Reihen von Iterationsverfahren werden die Fehler mit wachsender Gliederzahl und zunehmender Anzahl von Iterationen kleiner, sofern die zugrunde liegenden Folgen konvergieren. Konvergieren die Folgen nicht, so wäre es völlig sinnlos, damit weiter zu rechnen. Man muß also die Konvergenz durch einen Konvergenzbeweis zuvor sichern. Konvergiert eine Reihen- oder Iterationsfolge in einem gewissen Gebiet, aber außerhalb desselben nicht mehr, so muß dort zu einer anderen Darstellung oder einem anderen Iterationsverfahren übergegangen werden.

Zu den im allgemeinen leicht vermeidbaren Fehlern zählen solche, die zu einem Maschinen-Stop führen, wie Divisions-Überlauf und Charakteristik-Überlauf bei Rechnungen mit gleitendem Komma. Der Divisions-Überlauf tritt ein, wenn durch Null dividiert werden soll, da für diese Aufgabe kein allgemeingültiges sinnvolles Ergebnis vorhanden ist, auch dann nicht, wenn der Dividend ebenfalls null ist. Sollte dieser Fall durch entsprechende Programmierung nicht grundsätzlich unmöglich gemacht worden sein, so muß man sich von vornherein überlegen, was in einem solchen Fall zu tun ist, und dies in der Programmierung berücksichtigen, und zwar muß man, bevor die Division stattfindet, eine Abfrage einfügen: „Ist Divisor gleich Null?“ Der Charakteristik-Überlauf ist nicht so einfach zu vermeiden. Strenggenommen müßte man vor jeder der vier (Gleitkomma-) Rechenoperationen eine Abfrage „Ist Charakteristiküberlauf möglich?“ einfügen⁴⁾. Ein solches Vorgehen würde den Ablauf zu sehr stören und wird auch praktisch kaum durchgeführt. Glücklicherweise reicht das normale Charakteristikvolumen für die meisten Rechnungen aus, ohne daß Gefahr für ein Überlaufen eintritt. Aber bereits bei umfangreichen Matrizenoperationen (Elimination, Inversion, Ermittlung des charakteristischen Polynoms) sind Charakteristik-Überläufe keine Seltenheit. Insbesondere sind bei Gleichungssystemen mit kleiner oder verschwindender Determinante Gefahren für Divisions- bzw. Charakteristik-Überläufe vorhanden. In Netzen ist dies der Fall bei Resonanzerscheinungen. Welche Regeln zu beachten sind, damit die Determinante von Gleichungen der Netze nicht verschwindet, ist in den Arbeiten [13 bis 15] ausgeführt. Ein Existenzbeweis für die eindeutige Lösung des Gleichungssystems kann vor Divisions- bzw. Charakteristik-Überlauf weitgehend schützen.

Zusammenfassung

Mit fortschreitender Vervollkommenheit der Technik ist eine verbesserte Analyse der Zustände und Vorgänge im Netz notwendig und mit modernen Hilfsmitteln auch möglich. Dies wirkt sich in einer preisgünstigeren und auch in der Leistungsfähigkeit besseren Projektierung der Netze

4) Um einen Charakteristik-Überlauf exakt feststellen zu können, müßte die betreffende Gleitkomma-Operation in Festkomma simuliert werden. Damit könnte man vom Vorteil der Gleitkommaarithmetik keinen Gebrauch machen. Deshalb ist es nur sinnvoll, eine Charakteristiken-Abfrage durchzuführen.

und deren Einrichtungen aus. Weil man mit fortschreitender Entwicklung auch schwierigere Probleme angreift, werden die angewandten Rechenverfahren immer komplizierter. Solange keine Digitalrechner zur Verfügung standen, konnte man viele der mit dem Rechenschieber nicht mehr zu bewältigenden Aufgaben mit Hilfe des Netzmodells und weiterer Analogrechner lösen. Die Einführung dieser Geräte brachte seinerzeit einen großen Fortschritt. Die entwickelten Geräte und Methoden sind trotz bedeutender Entwicklungen sowohl im Bau als auch in der Programmierung der Digitalrechner zum Teil auch heute noch nicht überholt. Zahlreiche Aufgaben jedoch — und hierzu gehören solche, die mit größerer Genauigkeit durchgerechnet werden müssen und solche von hauptsächlich datenverarbeitendem Charakter — werden mit Hilfe von Analogrechnern niemals befriedigend gelöst werden können. Diese Lücke kann der Digitalrechner ausfüllen. Darüber hinaus kann der Digitalrechner in seiner universellen Eigenschaft auch die Aufgaben übernehmen, die bisher den Analogrechnern vorbehalten blieben. Durch die Möglichkeit, die Programme für diese Aufgaben beliebig zu kombinieren, ohne daß der Datenfluß unterbrochen wird und ohne daß der Mensch eingreifen braucht, ist es jetzt möglich, gewisse größere Aufgaben in einem Zuge durchzurechnen. Hierdurch werden Fehlerquellen weitgehend vermieden, da ein einmal durchgeprüftes Programm immer richtig rechnet und Fehler durch Datentransport ausgeschaltet werden.

Schrifttum

[1] McCracken, D. D.: Digital Computer Programming. J. Wiley and Sons, New York 1957.
[2] Carleton, J. T., u. Chackan, N., u. Martin, T. W.: The use of programming techniques for solving engineering problems. Trans. Amer. Inst. electr. Eng. (I) Bd. 78 (1959) S. 596-601.
[3] Zemanek, H.: Die algorithmische Formelsprache ALGOL. Elektron. Rechenanlagen Bd. 1 (1959) S. 72-79 u. S. 140-143.
[4] Edelmann, H.: Normierte Komponentensysteme zur Behandlung von Unsymmetrieproblemen in Drehstrom- und Zweiphasennetzen (mit besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse des Netzmodells). Arch. Elektrotechn. Bd. 42 (1956) S. 317-331.
[5] Edelmann, H.: Vorteile beim Arbeiten mit α/β -Komponenten und deren wichtige Eigenschaften. ETZ-A Bd. 78 (1957) S. 600-606.
[6] Bauer, H., u. Edelmann, E.: Der SIELOMAT, ein Hilfsmittel des Lastverteilers für optimalen Kraftwerkeinsatz. Elektr.-Wirtsch. Bd. 57 (1958) S. 173-180 u. S. 301-307 u. S. 389-392.
[7] Carteron, H. J.: Calcul arithmétique des réseaux maillés et de leurs pertes. Bull. Soc. Franç. Electr. Bd. 6 (1956) S. 465-472.
[8] Roek, J.: Über digitale Methoden zur Ermittlung von Leistungen und Spannungen in Drehstrom-Verbundnetzen. Anwendung elektrischer Rechenanlagen in der Starkstromtechnik. VDE-Buchreihe Bd. 3. VDE-Verlag, Berlin 1958, S. 172-179.
[9] Schneider, W.: Der Einsatz elektronischer Rechenanlagen für die Ermittlung der Energieverteilung in einem vermaschten Netz. Elektr.-Wirtsch. Bd. 57 (1958) S. 9-11.
[10] Prinz, H.: Elektronische Netzberechnung. Elektr.-Wirtsch. Bd. 57 (1958) S. 524-534.
[11] Bauer, F. L., u. Baumann, R.: Mathematische Behandlung von Netzwerksaufgaben mit Hilfe elektronischer Ziffernrechenanlagen. Elektr.-Wirtsch. Bd. 57 (1958) S. 181-187.
[12] Renz, H.: Netzmodelle und programmgesteuerte Rechenmaschinen als Hilfsmittel der Netzplanung. AEG-Mitt. Bd. 49 (1959) S. 220-228.
[13] Edelmann, H.: Allgemeine Grundlagen der Netzberechnung mit Inzidenzmatrizen. Arch. Elektrotechn. Bd. 44 (1959) S. 419-440.
[14] Edelmann, H.: Die Inzidenzmatrizen der Schnittmengen eines Netzes. Arch. Elektrotechn. Bd. 45 (1960) S. 347-356.
[15] Edelmann, H.: Transformatoren und andere Vierpole in der Netzberechnung mit Inzidenzmatrizen. Arch. Elektrotechn. Bd. 45 (1960) S. 479-500.
[16] Baumann, R.: Automatisierte digitale Netzberechnung. Elektronische Rechenanlagen Bd. 2 (1960) S. 75-84.
[17] Mollwitz, W.: Planung in Mittelspannungsnetzen mit Hilfe des Digitalrechners. Elektr.-Wirtsch. Bd. 59 (1960) S. 188-195.
[18] Frey, W.: Betrachtungen über den Einsatz elektronischer Rechenmaschinen zur Behandlung von Fragen der Energieerzeugung und -übertragung. Brown-Boveri-Mitt. Bd. 47 (1960) S. 284-291.
[19] Baumann, R., u. Boll, G., u. Schneider, W.: Anwendung von programmgesteuerten Rechenmaschinen zur Berechnung elektrischer Netze. Elektr.-Wirtsch. Bd. 60 (1961) S. 36-43 u. S. 96-101.
[20] Edelmann, H.: Berechnung des optimalen Verbundbetriebs in Energieübertragungsnetzen. Siemens-Z. Bd. 35 (1961) S. 57-58.
[21] Edelmann, H.: Optimaler Verbundbetrieb unter besonderen Nebenbedingungen. Elektr.-Wirtsch. Bd. 60 (1961) H. 3, S. 61-64.
[22] Edelmann, H.: Digitale Berechnung von Lastverteilerkurven für optimalen Verbundbetrieb auf der Siemens-Datenverarbeitungsanlage 2002. Elektron. Rechenanlagen Bd. 3 (1961) H. 1, S. 13-20.
[23] Second Power Industry Computer Application Conference, St. Louis, Missouri, 9. bis 11. Nov. 1960. Hrsgb. Amer. Inst. electr. Eng., Mack Printing Comp., Easton (USA).
[24] Haus, H. A.: Studienreform in der elektrotechnischen Abteilung des Massachusetts Institute of Technology. Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 78 (1961) H. 5, S. 205-213.
[25] Edelmann, H.: Die Berechnung von Impedanz-Admittanz- und gemischten Matrizen für besondere Klemmenpaare eines Netzes. Arch. Elektrotechn. Bd. 46 (1961) H. 5, S. 325-336.
[26] Ware, Wm. E.: Digital computer applied on-line real-time to assign electric load generation at minimum incremental cost. Computers and Automation Bd. 10 (1961) H. 11, S. 17-18.

Untersuchungen der Belastungsverhältnisse von Kabeln und Transformatoren in städtischen Niederspannungs-Maschennetzen

Von Günter Huhle, Darmstadt*)

DK 621.311.11

Die wichtigste Frage bei der Projektierung von Niederspannungs-Maschennetzen ist die nach den zweckmäßigsten Kabelquerschnitten und Transformatorgrößen in den Netzstationen. Die Bemessung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten, nach dem Spannungsfall oder nach der thermischen Belastbarkeit der Kabel ist im Schrifttum bereits eingehend behandelt worden, wobei aber stets ein idealisiertes Netz mit symmetrischem Aufbau und gleichmäßiger Belastungsverteilung vorausgesetzt wurde. Im folgenden wird an Hand einer Reihe von Netzmodelluntersuchungen ausgeführt oder projektierter Niederspannungs-Maschennetze die Belastung der Kabel und der Transformatorstationen ermittelt, damit man für die praktisch vorkommenden Fälle einen eindeutigen Zusammenhang zwischen notwendigem Kabelquerschnitt und höchstzulässiger Stationsgröße gewinnt.

Es zeigt sich, daß infolge der Unregelmäßigkeiten im Aufbau und in der Belastungsverteilung der Maschennetze nur die Wahrscheinlichkeiten angegeben werden können, mit der abweichende Belastungen — insbesondere auch in Störungsfällen — von einem leicht zu bestimmenden Mittelwert auftreten können.

Grundsätzliches

Die rechnerische Behandlung normaler vermaschter Netze ist sehr schwierig und bei dem Umfang der üblichen Niederspannungs-Maschennetze nahezu unmöglich. Bei der Feststellung der Belastungsverhältnisse bedient man sich daher mit Erfolg der Netzmodelle, mit denen das zu untersuchende Netz unter Berücksichtigung eines Maßstabsfaktors nachgebildet wird, und mit dem die im Normalbetrieb¹⁾ und im Störungsfall auftretenden Ströme und Spannungen an beliebigen Punkten des Netzes gemessen werden können.

Die Erfahrung lehrt, daß die von den Stationen abgehenden Kabel stets am stärksten belastet sind und daß sich die Bemessung der Stationstransformatoren nach der Anzahl und Belastung der Stationsabgänge zu richten hat. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Belastung der Kabel und Transformatoren nicht nur im ungestörten Betrieb in den zulässigen Grenzen bleiben muß, sondern auch im Falle einer Störung. Bei Ausfall eines Niederspannungskabels, einer Station oder eines Oberspannungskabels muß die Versorgung aufrechterhalten bleiben, ohne daß Kabel oder die anderen Stationen überlastet werden.

Niederspannungskabelaufälle wirken sich nur wenig auf die Belastung der Nachbarkabel aus, so daß dieser Störungsfall im allgemeinen nicht kritisch ist. Beim Ausfall einer Station hingegen muß das Gebiet der ausgefallenen Station von den Nachbarstationen versorgt werden, wodurch sich die Belastung sowohl dieser Stationen als auch der von diesen ausgehenden Kabel erhöht. Der Ausfall eines Hochspannungsstranges mit den an ihm liegenden Stationen bringt eine weitere Belastungserhöhung, die aber dadurch in Grenzen gehalten werden kann, daß nicht zwei benachbarte Stationen an dasselbe Hochspannungskabel angeschlossen werden („Verschachtelung“ der Hochspannungsstränge).

Die Belastung der Transformatoren im Störungsfall richtet sich in erster Linie nach dem Verhältnis der ausgefal-

lenen Transformatoren zur Gesamtzahl der Transformatoren, letzten Endes also nach der Anzahl der Hochspannungsstränge. Bei ausgedehnten Netzen und nicht vollkommener „Verschachtelung“ der Hochspannungsstränge wird jedoch die nähere Nachbarschaft der ausgefallenen Stationen stärker zur Ersatzlieferung herangezogen, so daß oberhalb einer gewissen Strangzahl keine Verbesserung hinsichtlich der Transformatorausnutzung mehr zu erreichen ist. Modellmessungen ergaben, wie später noch näher ausgeführt wird, daß selbst in großen Netzen mit vielen (z. B. 20) Transformatorstationen bei Ausfall von nur einer Station die unmittelbar benachbarten Stationen Belastungserhöhungen von 15 bis 25 % aufwiesen.

Erläuterungen und Zweck der Untersuchungen

Zunächst sollen einige allgemeine Zahlen und charakteristische Größen ausgeführter Maschennetze angegeben werden. In städtischen Netzen sind die am häufigsten benutzten Kabelquerschnitte 50 mm², 70 mm² und 95 mm² bei Kupferleitern, vereinzelt ist auch 120 mm² bei Aluminiumleitern anzutreffen.

Die Stationsgrößen schwanken im allgemeinen zwischen 315 und 630 kVA Transformator-Nennleistung, wobei größere Transformatoren in Netzen mit stärkerem Kabelquerschnitt eingebaut werden. Die Stationsdichte wird durch die sogenannte spezifische Maschenzahl ausgedrückt und gibt die Anzahl der Maschen (Straßenvierecke) an, die im Mittel von einer Station versorgt werden. Sie liegt je nach der Lastdichte, der Weite des Straßennetzes und dem Kabelquerschnitt zwischen 3,5 Maschen je Station und 1 Masche je Station. Bei der Mehrzahl der untersuchten Netze kommt auf ungefähr jeden dritten Netzknotenpunkt eine Station.

Die Straßenweiten (Abstände von Knotenpunkt zu Knotenpunkt) liegen im allgemeinen zwischen 100 und 200 m mit wenigen Abweichungen nach unten bis 40 m und nach oben bis 400 m. Straßenweiten über 250 m sind nur noch vereinzelt anzutreffen.

Die Größe eines Maschennetzbezirks ist sehr unterschiedlich und schwankt zwischen 2 und 15 MW Gesamtlast. Der Bezirk wird häufig durch natürliche Begrenzungen wie Parks, Bahnanlagen und Flußläufe festgelegt.

Tafel 1. Zusammenstellung der charakteristischen Kenngrößen der untersuchten Netze.

Netz ¹⁾	Lastdichte MVA/km ²	Kabelquerschnitt mm ² Cu	Nennleistung der Stations- transformatoren kVA	Stationsdichte Maschen je Station	Straßenweite im Mittel m	Spezifische Streckenlast längs der Kabel im Mittel kVA/km
A	7	95	400 bis 500	2,85	170	230
B	3	50 bis 70	315	2,7	180	150
C	6	50 bis 70	315 bis 630	1,7	180	300
D	5	95	400	2,3	150	170
E	4	50	400 bis 630	2,7	150	220
F	6,6	70	315	2,3	130	270
G	6	70	400 bis 630	3,3	150	240
H	1	50	400	1,5	220	120
und Freileitungen						
J	rd. 1-2	70	315 bis 500	3,3	200	120

¹⁾ Die Netze A, B, C, D und G versorgen Großstädte; das Netz C gehört zu demselben Netzbezirk wie das Netz B, das jedoch durch Einbau neuer Stationen die doppelte Leistungsfähigkeit erhalten hat. Von den übrigen Netzen sind

E Kleinstadtbezirk mit sehr regelmäßigem Straßenbild

F, H Kleinstadtbezirk mit sehr unregelmäßigem Straßenbild

J Villenvorort einer Großstadt mit aufgelockerter Bauweise

*) Dr.-Ing. G. Huhle ist Dozent an der Staatlichen Ingenieurschule in Frankfurt a. M.

Die Arbeit ist ein Auszug aus seiner Dissertation an der TH Darmstadt (D 17). Sie entstand während seiner Zugehörigkeit zur AEG in Frankfurt a. M. Der Verfasser dankt Prof. Dr.-Ing. L. Lebrecht und Prof. Dr.-Ing. W. Krämer sowie der AEG für die wohlwollende Unterstützung.

¹⁾ Als Normalbetrieb wird in dieser Arbeit der störungs- und fehlerfreie Betriebszustand bezeichnet.

Die mittlere Lastdichte ist für die Netzgestaltung von ausschlaggebender Bedeutung. Nach ihr richtet sich in erster Linie der Kabelquerschnitt und die Leistung der Netzstationen. Häufig anzutreffende spezifische Flächenbelastungen sind:

Wohngebiet in aufgelockerter Bauweise, wie Villenviertel, Siedlungen u. dgl.	1 MVA/km ²
Wohngebiet mit überwiegend zweistöckigen Häusern in geschlossener Bauweise	2 MVA/km ²
Wohngebiet mit überwiegend vierstöckigen Häusern in geschlossener Bauweise	3 bis 4 MVA/km ²
Geschäftsviertel im Stadtkern von Großstädten	
bis 100 000 Einwohner	6 bis 10 MVA/km ²
100 000 bis 500 000 Einwohner	10 bis 15 MVA/km ²
über 500 000 Einwohner	15 bis 25 MVA/km ²

Für den am häufigsten vorkommenden Fall der städtischen Niederspannungsversorgung, nämlich Wohngebiete üblicher Art, liegen eine Reihe von Netzmodelluntersuchungen vor, deren charakteristische Kenngrößen in Tafel 1 aufgeführt sind. Wie aus dieser zu sehen ist, ist die Lastdichte der untersuchten Netze unterschiedlich und bewegt sich zwischen 1 und 7 MVA/km². Dementsprechend sind auch die Stationsgrößen, insbesondere aber auch die Stationsdichten verschieden. Für letztere liegen Netze mit Werten von 1,5 bis 3,3 Maschen je Station vor, so daß die Auswahl dieser Netze einen repräsentativen Querschnitt durch alle vorkommenden Maschennetze in üblichen Wohngebieten darstellt.

Sämtliche Netze wurden auf einem Wechselstrom-Netzmodell unter Berücksichtigung eines Maßstabsfaktors impedanzmäßig nachgebildet. Verteilte Lasten auf den einzelnen Kabelstrecken wurden durch eine Ersatzlast im Lastschwerpunkt der jeweiligen Strecke dargestellt, wobei im allgemeinen ein für alle Verbraucher einheitlicher Leistungsfaktor — meist $\cos \varphi = 0,9$ — zugrunde gelegt wurde. Die Transformatoren, Kabel und Verbraucherlasten wurden einphasig dargestellt, was symmetrische Lasten im wirklichen Netz voraussetzt. Messungen in städtischen Netzen haben ergeben, daß die einzelnen Phasenströme in einer Station tatsächlich nur selten um mehr als $\pm 20\%$, zur Zeit der Höchstlast sogar um nur $\pm 15\%$ von ihrem Mittelwert abweichen.

Da ein Maschennetz in der Regel durchweg mit gleichem Kabelquerschnitt verlegt wird und die Stationsabgänge stets die größten Ströme führen, kann sich die Untersuchung auf eine Betrachtung der Belastung der Stationsabgänge beschränken. Im folgenden sollen daher mit der Bezeichnung „Kabel“ stets nur die Stationsabgangskabel und mit „Kabelbelastung“ stets der Strom im Kabelanfang gemeint sein.

Die zweckmäßigste Art der Darstellung vieler Zahlen, in diesem Fall Meßwerten, ist die graphische Darstellung in Form von Häufigkeitsverteilungen. Diese wurde daher im folgenden angewendet.

Die Häufigkeitsverteilungs-Kurven der absoluten Kabelbelastungen lassen keine Gesetzmäßigkeit erkennen, nach denen diese im voraus bestimmt werden könnten. Neben der durch die unterschiedlichen Längen der einzelnen Kabelstrecken, der unregelmäßigen Belastungsverteilung und der nie ganz gleichmäßigen Stationsverteilung hervorgerufenen Streuung gibt es noch weitere Gründe, die eine Streuung der Stromwerte verursachen. Infolge der niederspannungsseitigen Verknüpfung der Stationen untereinander sind die prozentualen Belastungen der Transformatoren nahezu alle gleich. Die Stationen haben aber eine unterschiedliche Zahl von Kabelabgängen und sind oft noch mit Transformatorn verschiedener Größe oder abweichender Kurzschlußspannung ausgerüstet.

Der zuletzt genannte Einfluß kann ausgeschaltet werden, indem man die Kabelbelastungen auf die jeweilige Stationsbelastung bezieht. Der Einfluß der unterschiedlichen Zahl

der Abgänge wird eliminiert, indem man die Kabelbelastungen auf die durch die Anzahl der Abgänge geteilten Stationsbelastung oder — was dasselbe ist — auf den arithmetischen Mittelwert I_m der Kabelbelastungen der jeweiligen Station bezieht. Beide Größen, die voraussichtliche Stationsbelastung und die Anzahl der Abgänge, lassen sich bei Neuprojektierungen bestimmen oder mindestens leicht abschätzen. Damit ist der mittlere Strom in den Kabeln bekannt, um den sich größenordnungsmäßig die Werte der wirklichen Ströme in einem durch die Unregelmäßigkeiten des Netzaufbaus bedingten Streubereich bewegen.

Um zu erkennen, ob die Menge der Bezugswerte I/I_m einem Häufigkeitsverteilungsgesetz gehorcht, werden die Meßwerte der Größe nach geordnet und ihre Ordnungszahlen in Prozenten der Gesamtzahl der Meßwerte ausgedrückt („Summenhäufigkeitsprozent“). Die Zuordnung dieser Summenhäufigkeitsprozente zu den Bezugswerten I/I_m ergibt eine Integralkurve der Häufigkeitsverteilung, die bei

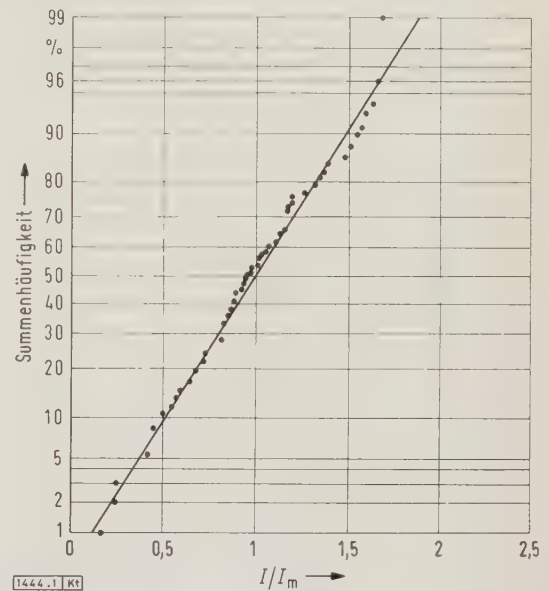


Bild 1. Häufigkeitsverteilung der auf den arithmetischen Mittelwert I_m bezogenen Kabelbelastungen I in einem Maschennetz bei Normalbetrieb.

Vorliegen einer Gaußschen Normalverteilung eine Gerade ergibt, wenn man für die Ordinate eine Teilung nach der Funktion

$$y = \frac{100}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-x^2} dx$$

wählt²⁾. Hierin stellen x eine lineare Unterteilung der Ordinatenachse in irgendeinem Maßstab und y die Summenhäufigkeitsprozente dar.

Voraussetzung für genaue Häufigkeitsverteilungs-Kurven ist Vollständigkeit der gemessenen Werte in einem Netz. Bei ungestörtem Betrieb wurden alle Werte gemessen. Von allen möglichen Störungsfällen wurden diejenigen ausgewählt, die für alle in Frage kommenden Kabel und Transformatoren mindestens einmal eine maximale Belastung hervorrufen. Da ein bestimmtes Kabel bei verschiedenen Störungsfällen unterschiedlich belastet wird, wurde jeweils nur der Störfall gezählt, der in dem betreffenden Kabel die größte Belastung hervorrief.

Belastung der Kabel im ungestörten Betrieb

Die Ströme in den Abgängen der Stationen im ungestörten Betrieb sind in Form einer Häufigkeitsverteilungs-Kurve für ein Netz in Bild 1 dargestellt. Die Meßpunkte gruppieren sich recht gut um eine Gerade, d. h. die Menge der

²⁾ Wahrscheinlichkeitspapier, zu beziehen durch Schleicher & Schüll, Göttingen.

Meßwerte stellt eine Gaußsche Normalverteilung dar. Die anderen Netze ergeben ganz ähnliche Verteilungen mit nahezu derselben Streuung, die sich durch die Steigung der Ausgleichsgeraden ausdrückt. Bild 2 zeigt die Ausgleichsgeraden der verschiedenen Netze in einem Diagramm, um die Übereinstimmung darzustellen. Wie aus diesem Bild zu sehen ist, zeigen lediglich die Werte des Netzes A eine abweichende Streuung. Dieses Netz weist mit seinem starken Kabelquerschnitt (95 mm² Cu) und mit einer sehr engen Vermaschung eine besonders gute Ausgleichsfähigkeit auf, wodurch die Kabelbelastungen weniger

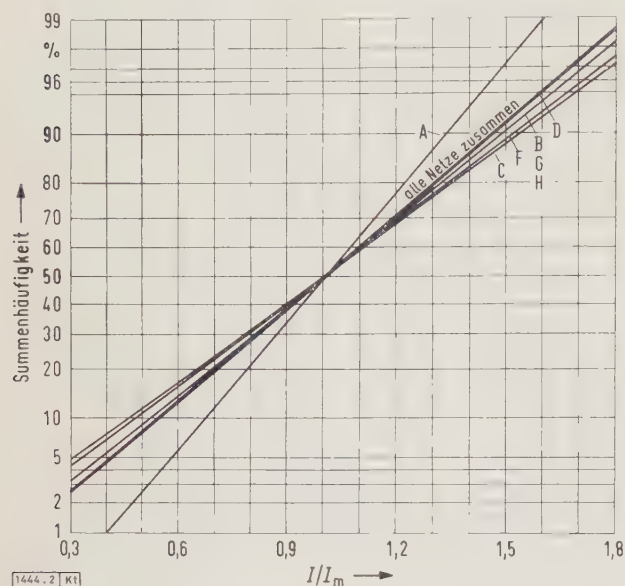


Bild 2. Ausgleichsgeraden der Häufigkeitsverteilungen der relativen Kabelbelastungen I/I_m im Normalbetrieb bei den Netzen A, B, C, D, F und G (vgl. Tafel 1).

streu. Die Ausgleichsgerade für die Meßwerte aller Netze zusammen stimmt mit der des Netzes D überein.

Rein mathematisch läßt sich eine Normalverteilung durch den „Zentralwert“ (Häufigkeitsmaximum, in der hier gewählten Darstellungsweise der Schnittpunkt der Geraden mit der 50%-Linie) und eine beliebige Streuspanne beschreiben. So entspricht z.B. der Wert des in der klassischen Statistik häufig verwendeten Streuungsmaßes „Mittlere quadratische Streuung“ etwa der 68%-Spanne. Im Gebrauch der Großzahlmethodik wird aber meist als Streuungsmaß die 90%-Spanne vorgezogen, weil man dadurch sofort eine Vorstellung von dem Bereich bekommt, in dem die Werte liegen, die man auch üblicherweise als „noch normal“ zu bezeichnen pflegt. Die 90%-Spanne umfaßt alle Meßwerte, die oberhalb der 5%-Linie und unterhalb der 95%-Linie auf der Skala der Summenhäufigkeitsprozente liegen [1].

Auf die vorliegenden Meßwerte angewendet, bedeutet die 90%-Spanne, daß 5% aller in einem Maschennetz vorhandenen Stationsabgänge voraussichtlich mehr als das 1,6-fache des mittleren Stromes führen. Da ein durchschnittlicher Maschennetzbezirk etwa 12 bis 15 Stationen mit insgesamt rd. 70 Stationsabgängen umfaßt, werden voraussichtlich etwa 3 bis 4 Kabel von dieser hohen Belastung betroffen. Welche Kabel dies sind, läßt sich auf Grund dieser allgemeinen Angaben natürlich nicht sagen. Dies festzustellen, ist eine der Aufgaben einer Netzmodelluntersuchung. Oft sind dies jedoch Kabel, bei denen schon ohne Messung, allein aus der Betrachtung der Konfiguration des Netzes, eine hohe Belastung vermutet werden kann. Es dürfte fast stets möglich sein, die drei oder vier ungünstigsten Stellen in einem Netz herauszufinden und dort besondere Vorkehrungen zu treffen. Der 95%-Wert bzw. die 90%-Spanne erscheint daher als sinnvolle Grenze für die allgemeine Bemessung von Maschennetzen im Vorplanungsstadium.

Belastung der Kabel im Störfall

Wie schon erwähnt, sind die Kabel nach den höchsten Belastungen zu bemessen, die im Störfall auftreten können, wenn infolge einer Störung eines Transformators oder eines Hochspannungskabels eine oder mehrere Stationen ausfallen und das Gebiet dieser Stationen von den Nachbarstationen mit versorgt werden muß. Der Ausfall mehrerer Stationen ist dabei der ungünstigere Fall.

Zweckmäßig werden die im Störfall auftretenden Kabelströme auf dieselben mittleren Ströme bezogen wie die Belastungen im Normalbetrieb. Auch hier ergeben sich Häufigkeitsverteilungen, die ihr Maximum allerdings nicht mehr bei einem Bezugswert $I/I_m = 1$ haben, sondern, wie Bild 3 und 4 zeigen, zwischen 1,3 und 1,8. Auch diese Verteilungen erfüllen sehr gut das Gaußsche Fehlerverteilungsgesetz, jedoch liegt diesem im Gegensatz zu den Normalbetriebswerten eine logarithmische Verteilung zugrunde. Für diese Kurven wurde daher ein Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmisch geteilter Abszissenachse verwendet.

Für die ungünstigsten Störfälle, nämlich den Ausfall eines Hochspannungsstranges mit den an ihm liegenden Stationen, ist in Bild 4 die Ausgleichsgerade für die Meßwerte aller Netze zusammen dargestellt. Ihr Zentralwert liegt bei einem Verhältnis $I/I_m = 1,6$ und die 90%-Spanne umfaßt die Werte von $I/I_m = 0,95$ bis $I/I_m = 2,65$. Das bedeutet, daß 5% aller Stationsabgänge bei ungünstigen Störfällen voraussichtlich mehr als das 2,65-fache des mittleren Normalbetriebsstromes führen werden. Wird der Kabelquerschnitt so gewählt, daß der höchstzulässige Strom in einem Kabelabgang das 2,5- bis 3-fache der mittleren Normalbetriebsbelastung beträgt, so kann damit gerechnet werden, daß nur an etwa 3 bis 4 Stellen die Stationsabgänge verstärkt werden müssen.

Da diese höchste Stromstärke nur im Störfall auftritt, und zwar nur in je nach Strangzahl vier oder sechs möglichen Störfällen, kann von einer beschränkten Überlastungsfähigkeit der Kabel Gebrauch gemacht werden. Nimmt man die von H. Weber [2] angegebene beschränkte Überlastbarkeit von 30% an, so ist der Kabelquerschnitt so zu wählen, daß die Kabel im Normalbetrieb im Mittel etwa 50% ihrer VDE-mäßigen Dauerbelastbarkeit haben.

Belastung der Stationstransformatoren

Enthielten die bisherigen Prüfungsergebnisse der Kabelbelastungen im Normalbetrieb und im Störfall Richt-

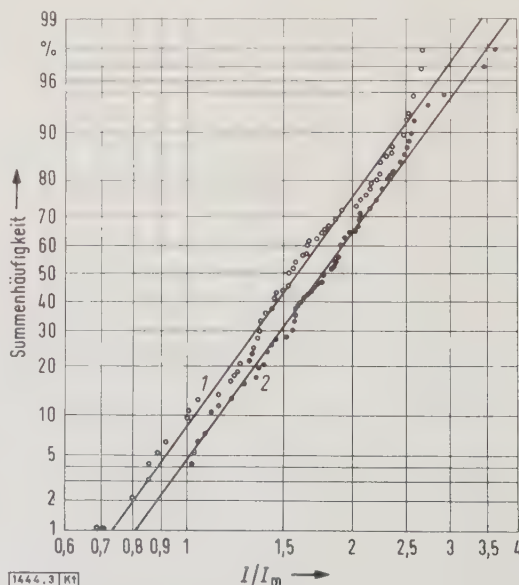


Bild 3. Häufigkeitsverteilung der Kabelbelastungen in einem Maschennetz im Störfall.

- 1 bei Ausfall jeweils einer Station
- 2 bei Ausfall jeweils eines Hochspannungsstranges

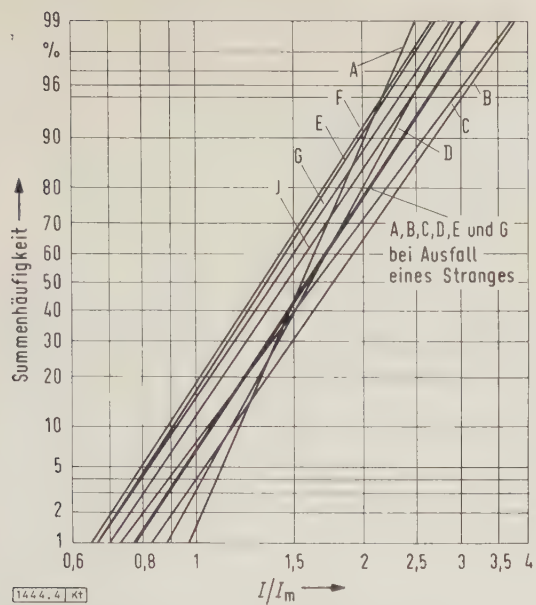


Bild 4. Ausgleichsgeraden der Häufigkeitsverteilung der relativen Kabelbelastungen I/I_m im Störfall bei den Netzen A, B, C, D, E, F, G und J.

linien dafür, wie die Stationsdichte und damit die Belastung der Stationen im Normalbetrieb zu wählen ist, so sollen die nun folgenden Messungen Aufschluß geben über die Belastung der Stationen im Störfall und damit über die Wahl der Stationstransformatoren.

Bild 5 zeigt an einem Beispiel, wie sich die Belastung der benachbarten Stationen erhöht, wenn eine Station ausfällt. Bei der unmittelbar benachbarten Station steigt ihre normale Belastung um 28 %, während die entfernteren Stationen mit 4 % und 2 % an der Lasterhöhung kaum noch beteiligt sind. Es spielt daher in einem großen Netz mit vielen Stationen keine wesentliche Rolle, wenn neben dieser noch einige weitere Stationen gleichzeitig ausfallen, sofern diese nur genügend weit von der ersten entfernt sind. Dieser Fall kann bei einem Hochspannungskabelfehler eintreten.

Der Ausfall von jeweils nur einer Station wurde bei den Netzen untersucht, bei denen entweder das versorgende Hochspannungsnetz noch nicht festgelegt oder so gestaltet war, daß auch im ungünstigsten Störfall nur eine Station ausfällt. Die Häufigkeitsverteilungs-Kurven der Transformator-Mehrbelastungen in Prozent der Normalbelastung wurden ebenfalls auf Wahrscheinlichkeitspapier mit logarithmischer

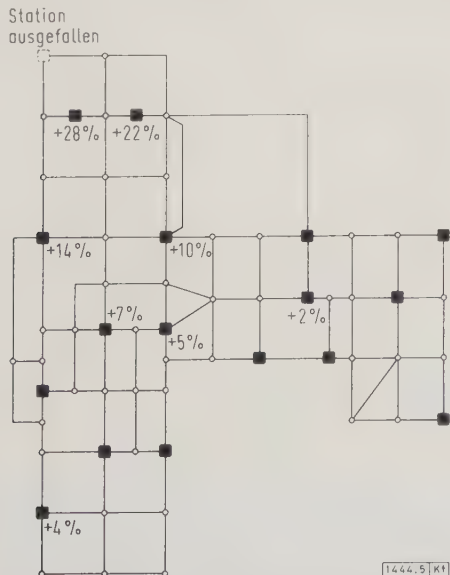


Bild 5. Belastungserhöhungen der Stationstransformatoren in einem Maschennetz bei Ausfall einer Station.

Teilung aufgezeichnet. Wie Bild 6 zeigt, läßt sich auch hier die Summenhäufigkeitsverteilungs-Kurve der Meßwerte aller untersuchten Netze durch eine Gerade annähern, so daß der Schluß nahe gelegt wird, daß eine normale logarithmische Verteilung vorliegt.

Wie bei den Kabelbelastungen wurde auch in diesem Fall für jede Station nur derjenige ungünstigste Störfall gezählt, der für die betreffende Station die größte Belastungserhöhung ergab. Bei den meisten Stationen betrug die größte Mehrbelastung 26 % (Maximum der Häufigkeitsverteilungs-Kurve), wenn jeweils nur eine Station ausfiel. Einzelne Stationen führten das 1,5-fache ihrer Belastung. Diese Extremwerte traten hauptsächlich dann auf, wenn einer Station in einem Randgebiet eine andere so vorgelagert war, daß sie beim Ausfall der Randstation deren Last zum größten Teil allein übernahm. Weiterhin können Extremwerte der Mehrbelastungen dann auftreten, wenn von zwei besonders dicht beieinanderliegenden Stationen eine ausfällt. Auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stationen über das ganze Netz ist daher zu achten.

Eine Betrachtung dieser Ergebnisse zeigt, daß es nicht möglich ist, die Transformatoren durch mehr als fünf Hochspannungsstränge besser auszunutzen. Weniger als vier

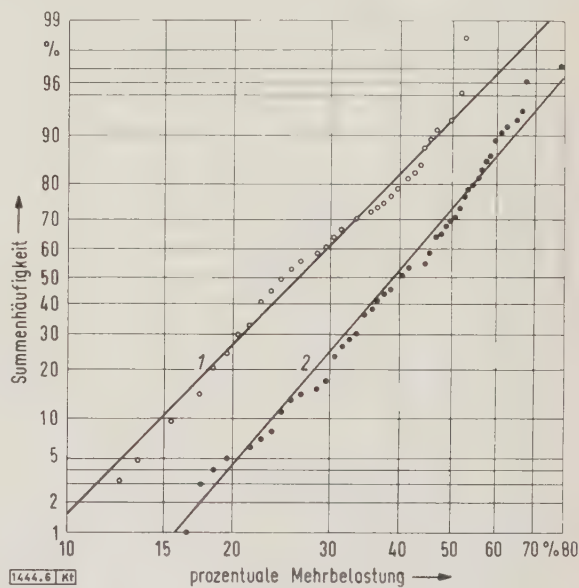


Bild 6. Prozentuale Mehrbelastung der Transformatoren aller untersuchten Netze im Störfall.

1 eine Station ausgefallen 2 ein Hochspannungsstrang ausgefallen
sollten es aber auch nicht sein, da sonst eine zu große Transformatorreserve benötigt wird. Auch spielt hierbei eine Rolle, wie weit die Verschachtelung der Hochspannungsstränge durchgeführt wurde.

Eine gute „Verschachtelung“ zur Herabsetzung der zu installierenden Transformatorleistung erfordert einen Mehraufwand an Hochspannungskabeln, so daß ein Komproß zu schließen ist. Es ist zweckmäßig, die Verschachtelung nur so weit zu treiben, daß die Belastung der Niederspannungskabel bei Ausfall eines Hochspannungsstranges nicht wesentlich höher liegt als bei Ausfall von nur einer Station. Dies wird erreicht, wenn der Anschluß zweier unmittelbar benachbarter Stationen an dasselbe Hochspannungskabel vermieden wird. Die dadurch erhöhte Stationsbelastung im Störfall kommt in Kurve 2 in Bild 6 zum Ausdruck. Die häufigste Transformatormehrbelastung liegt jetzt bei 40 %, die 5 %-Grenze bei 75 % der Normalbelastung.

Niederspannungs-Kabelquerschnitt und Stationsgröße

Selbstverständlich wird man bei der Bemessung der Stationstransformatoren von der durch die Wärmeträgheit bedingten Überlastungsfähigkeit weitgehend Gebrauch machen, da es sich beim Maschennetzbetrieb nur um gelegentliche Störfälle handelt, bei denen Wirtschaftlich-

keitsbetrachtungen keine Rolle spielen. Unter Zugrundelegung der in VDE 0532/1.59, § 31, angegebenen zulässigen Überlastungsdauer für Transformatoren und einer angenommenen Dauer der täglichen Belastungsspitze von 2 h können Transformatoren mit 110 % ihrer Nennleistung belastet werden, wenn ihre vorhergegangene Dauerlast 75 % des Nennwertes betrug. Bei Netztransformatoren liegt die Überlastbarkeit ohnehin oft über den VDE-Werten. Da außerdem diese Überlastungen nur selten (gelegentlich einer Störung) auftreten, kann nach *H. Weber* [2] auch eine höhere Belastung von 130 % des Nennwertes, unter Umständen sogar 150 % der Nennleistung in Kauf genommen werden, weil die durch diese Überlastung hervorgerufene Verkürzung der Lebensdauer dann nicht ins Gewicht fällt. Unter Zugrundelegung des zuerst genannten Wertes (130 %) sind die Transformatoren so auszulegen, daß sie im Normalbetrieb je nach Strangzahl und Verschachtelung des Hochspannungsnetzes 70 bis 85 % ihrer Nennleistung führen.

Im Zusammenhang mit den im letzten Abschnitt ermittelten Kabelbelastungen läßt sich somit für jeden Stationsstandort die höchstzulässige Stationsgröße, abhängig vom Kabelquerschnitt und von der Zahl der Stationsabgänge ermitteln. So wird z. B. in einem Netz mit einem Niederspannungs-Kabelquerschnitt von 50 mm² Cu eine Station mit sechs Abgängen im Normalbetrieb mit einer Leistung von etwa 400 kVA belastet werden dürfen. Bei einem mehrsträngigen, gut verschachtelten Hochspannungsnetz dürfte zur Beherrschung der Störungsfälle eine Transformatorleistung von 500 kVA ausreichen, bei einer weniger guten Verschachtelung, wie sie in der Praxis meist angewendet wird, wird ein 630-kVA-Transformator vorzusehen sein.

Bemerkenswert ist, daß insbesondere für Stationen mit acht Abgängen wesentlich größere Transformatoren zulässig sind, als heute allgemein üblich ist. Auch zeigen diese Überlegungen, daß es nicht immer richtig ist, Stationen einheitlicher Größe in einem Maschennetz einzubauen. Die Größe der Transformatoren ist vielmehr nach der Anzahl der abgehenden Niederspannungskabel zu bestimmen, wenn Kabel und Transformatoren gleichmäßig ausgelastet werden sollen.

Wirtschaftliche Betrachtungen

Wenn die Untersuchungen der vorhergehenden Abschnitte zu dem Ergebnis führten, daß die Kabel in den Stationsabgängen im Mittel nur mit 50 % ihrer höchstzulässigen Stromstärke und die Transformatoren in den Stationen nur zu etwa 70 % ihrer Nennleistung belastet werden dürfen, um den Störfall zu beherrschen, so drängt sich unwillkürlich die Frage auf, ob ein derartig überbemessenes Netz wirtschaftlich überhaupt vertretbar ist. Um diese Frage zu beantworten, muß man jedoch nicht nur die Errichtungskosten, sondern die Gesamtbetriebskosten betrachten, die sich aus den Kapitalkosten, den Unterhaltungskosten und den Kosten infolge der Übertragungsverluste ergeben [3 bis 6].

Für das Kabelnetz kann eine Nutzungsdauer von 40 Jahren angesetzt werden, da Kabel sehr langlebige Einrichtungen sind und in einem Maschennetz auch bei Laststeigerungen nicht ausgewechselt zu werden brauchen. Bei einem Zinssatz für das aufzuwendende Anlagekapital von 7 % ergibt sich damit ein Abschreibungsfaktor von 7,5 % je Jahr, zu dem noch etwa 1 % Unterhaltungskosten und 0,5 % für sonstige Nebenkosten hinzuzurechnen sind.

Die Übertragungsverluste lassen sich näherungsweise aus den Strömen in den Stationsabgängen berechnen, wenn man eine gleichmäßige Lastabnahme längs der Kabel annimmt. Sie beträgt in Drehstromnetzen

$$P_v = \frac{I^2 l}{\kappa q} \quad (1)$$

wobei I der Strom in den Stationsabgängen bei Höchstlast, l die gesamte Kabellänge, κ die elektrische Leitfähigkeit und q der Querschnitt eines Phasenleiters bedeuten.

Die Streuung der Ströme in den verschiedenen Stationsabgängen bei Normalbetrieb (nur dieser interessiert bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen) erhöht die gesamten Übertragungsverluste um einen Faktor F , der sich ebenfalls angenähert durch die Annahme unendlich vieler Abgänge berechnen läßt. Die Häufigkeitsverteilungs-Kurve der Kabelbelastungen wird zu diesem Zweck durch die exakte Gaußsche Normalverteilung mit der allgemeinen Gleichung

$$f(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-h^2 x^2} \quad (2)$$

ersetzt. Aus dem Diagramm in Bild 2 läßt sich der Wert h (Genauigkeitsmaß) zu 1,86 ermitteln, so daß Gl. (2) übergeht in

$$f(x) = 1,05 e^{-3,43 (I/I_m)^2} \quad (3)$$

Der Faktor für die Vergrößerung der Übertragungsverluste beträgt dann

$$F = \int_{-\infty}^{+\infty} (I/I_m)^2 \cdot 1,05 e^{-3,43 (I/I_m)^2} d(I/I_m) \quad (4)$$

Die Auswertung dieses Integrals ergibt für F den Wert 1,14, so daß sich die gesamten Übertragungsverluste im Niederspannungsnetz ergeben zu

$$P_v = 1,14 \cdot \frac{I_m^2 l}{\kappa q} \quad (5)$$

Mit den nach dieser Formel errechneten Übertragungsverlusten, ferner mit einem Leistungspreis von 150 DM/kWh je Jahr, einem Arbeitspreis von 0,05 DM/kWh und einer Form der Jahresdauerlinie, wie sie von *H. Junge* [8] angegeben worden ist, errechnet sich für eine Benutzungsdauer von 2500 h eine wirtschaftliche Stromdichte von 1,89 A/mm² und bei einer Benutzungsdauer von 4000 h eine solche von 1,67 A/mm². Das bedeutet, daß schon aus wirtschaftlichen Erwägungen die Kabel im Normalbetrieb nur etwa bis zur Hälfte ihres höchstzulässigen Stromes belastet werden sollten.

Die Maschennetzstationen werden in der Regel so einfach wie möglich aufgebaut: je ein Trenner für das ankommende und das abgehende Hochspannungskabel, ein Leistungstrenner mit Sicherungen für den Transformator. Auf der Niederspannungsseite befindet sich ein Leistungsschalter mit einem Rückleistungsrelais („Maschennetzschalter“) und die Niederspannungsverteilung, die ausschließlich mit Sicherungen bestückt ist.

Für Transformatoren bis 500 kVA Nennleistung kann eine einheitliche Größe des Stationsgebäudes angenommen

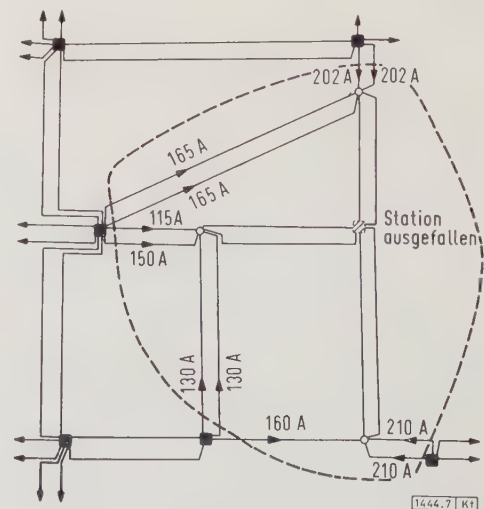


Bild 7. In das Gebiet einer ausgefallenen Station fließende Ströme innerhalb eines Ausschnitts aus einem hochbelasteten Maschennetzbezirk.

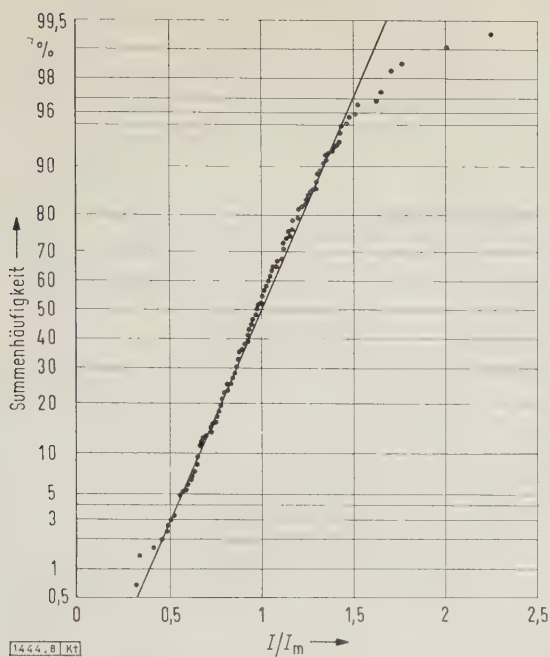


Bild 8. Stromverteilung in den Kabeln, die in das Versorgungsgebiet einer ausgefallenen Station führen.

werden, so daß bis zu dieser Größe einschließlich lediglich die Transformatorkosten und die Kosten des Maschennetzschalters leistungsabhängig sind. Je nach der Höhe der Oberspannung wird man von 630 bis 800 kVA Nennleistung an Stelle der oberspannungsseitigen Leistungstrenner mit Sicherungen Leistungsschalter vorsehen, so daß dadurch ein Kostensprung entsteht.

Der Preis der Transformatoren wird im Schrifttum [7]

oft als mit $\sqrt[4]{P_N}$ ansteigend angegeben, wobei P_N die Nennleistung bedeutet; bei diesen Betrachtungen sind jedoch die Kosten des Maschennetzschalters mit einzubeziehen. Diese Kosten liegen größenordnungsmäßig bei etwa 10 % der Transformatorpreise und lassen sich in erster Näherung ebenfalls mit in das obige Preisgesetz der Transformatoren einbeziehen. Wird die Nutzungsdauer der Stationen mit 20 Jahren angesetzt, so ergibt sich bei einem Zinssatz von 7 % ein Abschreibungsfaktor von 9,5 %. Hinzu kommen noch rd. 2 % Unterhaltungskosten und 0,5 % sonstige Nebenkosten, so daß sich für die Stationen ein Gesamt-Kapitaldienstfaktor von 12 % ergibt.

Mit diesen Werten errechnet sich bei einer Benutzungsdauer von 2500 h ein wirtschaftlicher Ausnutzungsgrad von 86,5 % und bei einer Benutzungsdauer von 4000 h ein solcher von 77 %. Zu bemerken ist dabei noch, daß die Kurven der Gesamtbetriebskosten in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad in der Nähe des wirtschaftlichen Optimums sehr flach verlaufen, so daß bei Abweichungen vom wirtschaftlichen Optimum nur unbedeutende Mehrkosten entstehen.

Maschennetze in Gebieten extrem hoher Lastdichte

Galten die bisherigen Untersuchungen von Maschennetzen in Wohngebieten mit einer mittleren spezifischen Flächenlastdichte von rd. 2 bis 4 MVA/km², so soll sich dieser Abschnitt mit der aktuellen Frage befassen, wie ein Maschennetzbetrieb in Gebieten extrem hoher Lastdichte mit 10, 20, ja sogar 40 MVA/km² gestaltet werden kann. Solche Netze sind heute schon im Kern vieler Großstädte vorhanden.

Hauptsächlich in den hochbelasteten Geschäftsstraßen ist der Forderung nach Sicherheit der Stromversorgung besonderes Gewicht beizulegen, da ein Stromausfall während der Hauptgeschäftszeiten katastrophale Folgen haben kann. Schon aus diesem Grund ist auch in diesen Gebieten ein Maschennetzbetrieb zu befürworten.

Zwei Umstände sind es jedoch, die in hochbelasteten Gebieten Abweichungen von den Belastungsverhältnissen der normalen Wohngebiete bedingen:

1. Die Stationsdichte ist so groß, daß an jedem Knotenpunkt und oft auch noch im Straßenzug Stationen eingebaut werden müssen. Der theoretische Kabelüberlastungsfaktor steigt dadurch, wie schon K. Menny [4] nachgewiesen hat, von rd. 1,4 auf 2 an.
2. An die Sammelschienen der Stationen werden oft größere Stromverbraucher, z. B. ein ganzes Geschäftshaus als Großabnehmer angeschlossen, die im Normalbetrieb die abgehenden Maschennetzkabel nicht belasten, im Störfall jedoch für die Bemessung der Abgänge der Nachbarstationen von Einfluß sind.

Aus diesen Gründen ist der oben genannte Kabelüberlastungsfaktor für diese Netze nicht mehr anwendbar. Dagegen erlaubt die große Stationsdichte ein anderes Verfahren zur Abschätzung der Kabelbelastungen im Störfall. Man kann in diesen Netzen für jede Station fast immer ein Gebiet abgrenzen, in das beim Ausfall dieser Station nur benachbarte Stationen einspeisen, wie Bild 7 an einem Beispiel zeigt. Der Gesamtbedarf dieses abgegrenzten Gebietes muß im Störfall von den in dieses Gebiet führenden Kabeln gedeckt werden; es läßt sich also eine mittlere Belastung je Zuführungskabel angeben. Die wirklichen Belastungen werden sich auch hier innerhalb eines gewissen Streubereichs um diesen Mittelwert gruppieren. Die Kenntnis dieses Streubereichs erlaubt, bei der Projektierung von Maschennetzen die Stationsdichte und damit den höchstzulässigen mittleren Kabelstrom so zu bestimmen, daß Kabelüberlastungen im Störfall mit großer Wahrscheinlichkeit vermieden werden.

Diese Untersuchungen sind ebenfalls an einigen Netzen durchgeführt worden, und zwar sind dies im einzelnen:

1. Teile aus dem Netz „C“ (Bild 2),
2. Wohnblocksiedlung mit vollelektrifizierten Wohnungen,
3. Geschäftsviertel einer Großstadt, Lastdichte 30 MVA/km²,
4. Geschäftsviertel einer Großstadt, Lastdichte 20 MVA/km²,

Die Summenhäufigkeitsverteilungs-Kurve der Kabelbelastungen in diesen vier Netzen zeigt Bild 8. Die Kurve hat Ähnlichkeit mit der Verteilungskurve der Kabelströme im Normalbetrieb in Netzen mit mittlerer Lastdichte, sie weist jedoch nur die geringere Streuung des Netzes „A“ auf. Maschennetze in Gebieten hoher Lastdichte werden aus wirtschaftlichen Gründen mit starkem Kabelquerschnitt ausgeführt und haben infolgedessen auch eine gute Ausgleichsfähigkeit. Bei diesen Netzen reicht es daher aus, zur Bestimmung der Stationsdichte einen Streufaktor von 1,5 (90 %-Spanne) für die Kabelbelastungen zugrunde zu legen. Die Belastung der Transformatoren im Störfall wird durch diese besonderen Verhältnisse nicht berührt, so daß sie nach den oben angegebenen Werten bemessen werden können.

Kurzschlußströme

Zum Schluß noch ein Wort über die Größe der Kurzschlußströme in vermaschten Netzen, da vielfach Bedenken bestehen, daß sie wegen der Vielzahl der zusammengeschalteten Transformatoren zu groß werden könnten. Im Netzmodell gemessen wird im allgemeinen der dreipolige Stoßkurzschluß-Wechselstrom bei sattem Kurzschluß. Man erhält damit die ungünstigstenfalls auftretenden Höchstwerte, zumal die Lichtbogen- und Übergangswiderstände großen Schwankungen unterworfen sind, und sie daher nicht genau genug ermittelt werden können.

Die Messungen zeigen, daß die Größe des dreipoligen Kurzschlußstromes in Maschennetzen mittlerer Lastdichte zwischen 10 und 25 kA an den Netzknotenpunkten und zwischen 30 und 40 kA an den Sammelschienen der Stationen schwankt. Sie wächst mit zunehmender Stationsgröße und

mit zunehmender Stationsdichte und damit Lastdichte, wie Bild 9 zeigt. Die gemessenen Höchstwerte in den einzelnen Netzen liegen durchweg höher als die errechneten Werte, da nicht nur die Stationsgrößen verschieden sind, sondern auch die Stationsdichten innerhalb eines Netzes örtlich sehr unterschiedlich sein können.

Die Werte gelten für ein praktisch unbegrenztes Netz. Von einer gewissen Netzausdehnung an steigen die Kurzschlußströme nicht mehr wesentlich, da sich entfernte Stationen wegen der dazwischenliegenden Kabelimpedanzen kaum noch an der Speisung des Kurzschlusses beteiligen. Eine Begrenzung in der Ausdehnung der vermaschten Gebiete wegen der Kurzschlußströme ist daher bei den heute in der städtischen Stromversorgung üblichen Lastdichten und Straßenweiten nicht erforderlich.

Schlußbetrachtungen

Von Interesse dürfte es sein, wie städtische Niederspannungs-Maschennetze nun tatsächlich ausgeführt werden. Maßgeblich für die Gestaltung des Niederspannungsnetzes ist das vorgegebene Straßennetz. Die Straßenweiten liegen im Mittel bei etwa 150 m. Interessanterweise bilden diese Werte ebenfalls eine logarithmisch-normale Gaußverteilung mit dem Streufaktor 2 für die 90 %-Spanne. Da die überwiegende Mehrzahl der Straßen beidseitig mit einem Kabel belegt sind, ergibt sich ein durchschnittlicher Kabelbedarf von 25 km/km², der in einzelnen Stadtteilen bis zu 30 km/km² ansteigen kann.

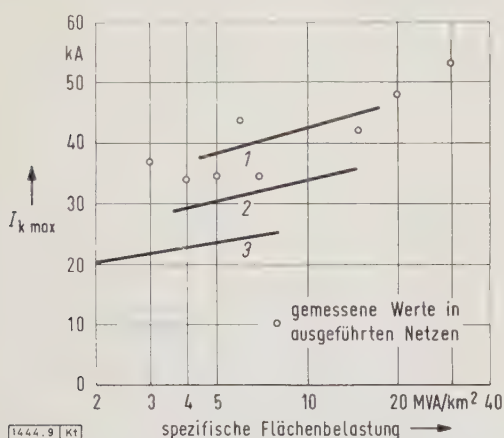


Bild 9. Abhängigkeit der maximalen Kurzschlußströme $I_{k \max}$ von der spezifischen Flächenbelastung (Belastungsdichte und Nennleistung der Station). Die Kurven 1 bis 3 wurden unter der Annahme eines regelmäßigen Netzaufbaues berechnet.

- 1 630-kVA-Stationen, Kupferkabel 70 mm²
- 2 500-kVA-Stationen, Kupferkabel 50 mm²
- 3 315-kVA-Stationen, Kupferkabel 35 mm²

Die durchschnittliche Lastabnahme längs der Kabel liegt zur Zeit etwa zwischen 120 und 240 kVA/km. Im Mittel kommt auf 1,85 km Niederspannungskabellänge eine Station, die durchschnittlich mit 330 kVA belastet ist. Der Versorgungsbereich einer Station geht somit nicht weit über „die nächste Straßenecke“ hinaus. Das Hochspannungsnetz weist bei mittleren Lastdichten etwa $\frac{1}{3}$ der Länge des Niederspannungsnetzes auf. Je Station kann mit 0,6 km Hochspannungskabellänge gerechnet werden. Die Länge des Hochspannungsnetzes wächst jedoch mit der Flächenbelastung, während die Länge des Niederspannungsnetzes weitgehend von der Lastdichte unabhängig ist.

Bei den sehr hohen Lastdichten, wie sie heute schon im Kern vieler Großstädte anzutreffen sind, wird das Hochspannungsnetz umfangreicher als das Niederspannungsnetz, und auch der Aufwand für die Stationen wird größer als für die Niederspannungskabel. Die schon oft gestellte Frage, ob ein vermaschtes Niederspannungsnetz auch bei hohen Lastdichten noch wirtschaftlich ist, oder ob man nicht nach anderen Lösungen, z. B. nur Hochspannungsversorgung,

suchen soll, läßt sich leicht beantworten, wenn man sich vor Augen hält, daß gerade in diesen Gebieten die Versorgungssicherheit von besonderer Bedeutung ist. Eine enge Vermaschung des Hochspannungsnetzes scheitert an dem Preis der hierfür erforderlichen vielen Selektivschutzeinrichtungen. Auch könnte der Ausfall eines Transformators dann nur durch Aufstellung einer Reserveeinheit gedeckt werden. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, daß gerade bei hohen Lastdichten die Bereitstellung einer ausreichenden Reserve durch ein vermaschtes Niederspannungsnetz die wirtschaftlichste Art der Sicherung der Versorgung ist.

Zusammenfassung

In der städtischen Niederspannungsversorgung wird in steigendem Maße von vermaschten Niederspannungsnetzen Gebrauch gemacht. Da eine Berechnung der Leistungsflüsse in umfangreicheren Maschennetzen mit den herkömmlichen Verfahren nahezu unmöglich ist, begnügt man sich oft mit Schätzungen, die man aus einem Vergleich mit einem regelmäßig aufgebauten und belasteten, und damit der Berechnung zugänglichen „Idealnetz“ gewinnt. Die wirklichen Belastungen in praktischen Netzen werden immer Abweichungen vom Idealzustand ergeben, die praktisch nur mit Hilfe einer Untersuchung auf einem Netzmodell oder neuerdings auch mittels elektronischer Rechenmaschinen ermittelt werden können.

Die Größe der Ströme in den stets am höchsten belasteten Stationsabgangskabeln läßt noch keine Gesetzmäßigkeit erkennen. Daher wurde versucht, die bei einer Reihe von Netzmodelluntersuchungen ermittelten Kabelströme auf einen Parameter zu beziehen, der einen Teil der die Größe der Kabelströme bestimmenden Einflüsse ausschaltet. Dieser Parameter muß aus Gründen der Zweckmäßigkeit leicht und durch eine möglichst einfache Regel errechenbar sein.

Die von einer Station abgehenden Kabel wurden zu diesem Zweck zu einer Gruppe zusammengefaßt und die Ströme I in diesen Kabeln auf den arithmetischen Mittelwert I_m dieser Ströme bezogen. Dieser Wert I_m läßt sich bei ausgeführten Netzen einfach ermitteln und bei Neuprojektierungen abschätzen. Die wirklichen Kabelströme gruppieren sich um diesen Mittelwert mit einem gewissen Streubereich, der nur noch durch die Unregelmäßigkeit der Netzgestalt und der Belastungsverteilung bestimmt wird.

Der Vergleich der Kabelströme verschiedener Maschennetze unter diesem Gesichtspunkt zeigt, daß die Häufigkeitsverteilungen der bezogenen Kabelbelastungen bei Maschennetzen in Gebieten mittlerer Lastdichte (2 bis 8 MVA/km²) und ohne daß größere Stromverbraucher unmittelbar von der Stationssammelschiene gespeist werden, alle gleichartig sind und damit eine Voraussage der zu erwartenden Kabelbelastungen in einem Maschennetz gestatten. Ferner zeigt sich, daß sich die höchsten Ströme in den Kabeln im jeweils ungünstigsten Störfall, auf denselben mittleren Strom bezogen, in logarithmisch-normaler Verteilung um einen Mittelwert gruppieren, der bei 1,6 liegt.

Unter Beachtung eines gewissen Streubereichs ist das Kabelnetz so auszulegen, daß die mittlere Normalbelastung der Stationsabgänge etwa 45 bis 50 % des höchstzulässigen Stromes betragen soll, wenn das Kabelnetz dem Störfall gewachsen sein soll. Mit Hilfe dieser mittleren Normalbelastung der Kabel ist es möglich, eine Beziehung zwischen Niederspannungs-Kabelquerschnitt und Stationsgröße herzustellen. Dazu ist nur noch die Kenntnis der vorzuhaltenden Transformatorreserve notwendig, die sich aus den gleichen Untersuchungen — auch bei sehr großen Netzen — zu etwa 40 bis 50 % bestimmt. Unter Ausnutzung einer gewissen zeitlich begrenzten Überlastungsfähigkeit der Transformatoren ergibt sich, daß die Umspanner im Normalbetrieb etwa bis zu 70 bis 80 % ihrer Nennleistung ausgelastet werden dürfen. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ergeben, daß diese Bemessung bei den heute geltenden Strompreisen

und bei einer mittleren Benutzungsdauer annähernd die geringsten Betriebskosten verursacht und daß die im Maschennetz enthaltene Reserve ohne oder mit nur geringen betrieblichen Mehrkosten bereitgestellt werden kann.

Schrifttum

[1] Daeves, K., u. Beckel, A.: Großzahlmethodik und Häufigkeitsanalyse. 2. Aufl. Verlag Chemie, Weinheim a. d. Bergstraße 1958.
[2] Weber, H.: Wirtschaftliche Belastung und Überlastbarkeit von Betriebsmitteln, besonders von Transformatoren und Kabeln. Elektr.-Wirtsch. Bd. 54 (1955) S. 571-578.

[3] Mangoldt, W.: Die wirtschaftliche Ausgestaltung städtischer Drehstromnetze. Diss. TH Berlin 1932.
[4] Menny, K.: Die wirtschaftliche Bemessung städtischer Drehstrom-Niederspannungs-Maschennetze. Diss. TH Hannover 1935.
[5] Weber, H.: Vermaschung von Drehstrom-Niederspannungsnetzen. Elektr.-Wirtsch. Bd. 52 (1953) S. 441-446.
[6] Wilhelm, H.: Dimensionierung von Städtischen SSW-Sonderdruck nach einem Kurzvortrag auf der 4. ordentlichen Mitgliederversammlung des Verbandes Bayerischer Elektrizitätswerke e. V. in Lindau am 24. Juni 1949.
[7] Thießen, W.: Wirtschaftliche Überlegungen bei der Planung von Transformatorenanlagen. Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 73 (1956) S. 476-480.
[8] Junge, H.: Die Jahresdauerlinie in Abhängigkeit vom Belastungsfaktor. ETZ Bd. 59 (1938) S. 999-1002.

Entwurf mehrsträngiger Wertungsschaltungen für den Reaktorschutz

Von Karl Peuster, Essen*)

DK 621.039.546

In der Schutztechnik, vor allem beim Reaktorschutz, werden die Wertungsschaltungen verwendet, deren Zweck die möglichst wirksame Ausschaltung von Anregefehlern ist. Hier soll eine Regel für den Aufbau solcher Schaltungen für den Fall angegeben werden, daß die Abfrageseite mit zwei oder drei unabhängigen Strängen arbeitet.

Einleitung und Terminologie

Wenn ein Schutz sowohl gegen passive Anregefehler, d. h. Ausbleiben einer notwendigen Anregung, als auch gegen aktive Anregefehler, d. h. Auftreten unberechtigter Anregungen, gesichert werden soll, wird eine Wertungsschaltung angewendet. Diese umfaßt mehrere gleichberechtigte Anregeglieder, die über eigene Kontakte oder Kontakte nachgeschalteter Hilfsrelais einen Abfragekreis steuern.

Vollkommene zweisträngige Schaltung

Bei einer 4-von-6-Schaltung soll die Anregung dann wirksam werden, wenn 4 beliebige der 6 vorhandenen Anregeglieder angesprochen haben. Dabei sollen ferner die beiden Stränge unterbrochen werden, da eine zweisträngige Schaltung einen Ruhestromkreis voraussetzt. Bei nur drei Anregungen darf hingegen ein beliebiger Strang geöffnet sein.

Zum Entwurf der Schaltung teilt man die 6 Anregeglieder in zwei Gruppen A und B zu je drei Gliedern auf. Für das Ansprechen sind dann insgesamt 4 Glieder erforderlich, die z. B. durch folgende Kombinationen zu erreichen sind:

- 3 Glieder A und 1 Glied B oder
- 2 Glieder A und 2 Glieder B oder
- 1 Glied A und 3 Glieder B.

Nach Bild 2a wird eine quadratische, vierstellige Matrix gezeichnet. Die Zeilen beziffert man nach der Zahl der möglichen Anregungen der Gruppe A und die Spalten nach Gruppe B. Rechts unter dem dick eingezeichneten Treppenzug liegen alle Felder, die mindestens 4 Anregungen entsprechen, in denen also die beiden Stränge offen sein müssen.

Es sei nun bestimmt, daß der Strang 1 entweder bei 0 Anregungen in A und 3 Anregungen in B — kurz mit 0 A; 3 B dargestellt — oder bei 2 A; 1 B geöffnet werden soll. Die diesen beiden Grundzuständen entsprechenden Felder werden mit einer unterstrichenen 1 markiert (Bild 2b), die über der dicken Linie liegen. Bei allen Zuständen, die von diesen Grundfeldern nach unten und nach rechts liegen, sind natürlich auch die Bedingungen 0 A; 3 B bzw. 2 A; 1 B erfüllt. Auch bei ihnen muß Strang 1 öffnen. Sie werden ebenfalls mit einer 1 markiert, die aber nicht unterstrichen wird, da sie nur eine Folge des Grundzustands ist. Bild 2b zeigt also die Zuordnung der Anregegruppierung für Strang 1.

Entsprechend Bild 2c ordnet man als Grundanregezustand für den Strang 2 die Gruppierungen 1 A; 2 B und 3 A; 0 B zu. Legt man Bild 2c auf 2b, so tragen alle Felder rechts unter dem Treppenzug für 4 Anregungen die Ziffern 1 und 2, entsprechend also der Unterbrechung beider Stränge.

Nach Bild 3 kann man jetzt für die beiden Stränge zunächst die Blockschaltbilder angeben. Da die Stränge in

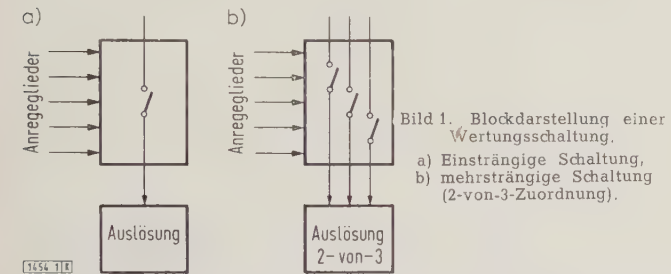


Bild 1. Blockdarstellung einer Wertungsschaltung.
a) Einsträngige Schaltung,
b) mehrsträngige Schaltung (2-von-3-Zuordnung).

ern, der die Anregung erst dann weitergibt, wenn einige der Anregeglier angesprochen haben.

Die Wertungsschaltung ist vollkommen, wenn die Mindestzahl der zur Gesamtanregung nötigen Einzelanregungen von der Konstellation der Einzelanregungen unabhängig ist. In diesem Fall werden aktive und passive Sicherheit gegen Störungen insgesamt am höchsten sein; es werden aber auch die meisten Kontakte gebraucht.

Die Wertungsschaltung ist einsträngig (Bild 1a), wenn alle Kontakte nur in eine einzige Abfrageleitung eingreifen; sie ist mehrsträngig (Bild 1b), wenn die Kontakte mehrerer unabhängiger Abfrageleitungen geschaltet werden. Die Abfrageleitungen sind dann untereinander selbst wieder in einer Wertungsschaltung der Auslösung zugeordnet.

Eine einsträngige Wertungsschaltung kann nicht geprüft werden, ohne daß gleichzeitig eine Auslösung geschieht. Bei einer mehrsträngigen Wertungsschaltung kann Strang für Strang einzeln geprüft werden, ohne daß ein Schaltvorgang eingeleitet wird.

Praktisch haben folgende mehrsträngige Schaltungen eine Bedeutung:

zwei Stränge, die zur Auslösung beide ansprechen müssen (2-von-2-Schaltung). Diese Schaltung ist nur für Ruhestrom brauchbar.

drei Stränge, von denen zur Auslösung mindestens zwei ansprechen müssen (2-von-3-Schaltung). Diese Schaltung ist für Ruhe- und Arbeitsstrom brauchbar.

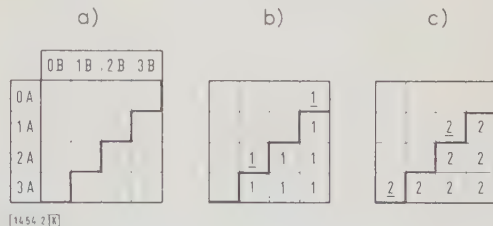


Bild 2. Entwicklung einer zweisträngigen 4-von-6-Schaltung.

- a) Grundmatrix,
- b) Belegung durch Strang 1,
- c) Belegung durch Strang 2.

*) Dipl.-Ing. K. Peuster ist Sachbearbeiter bei der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk AG, Essen.

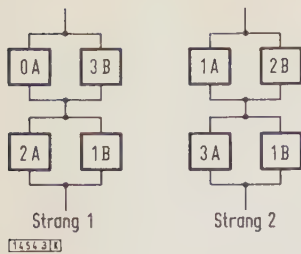


Bild 3. Blockschaltung der Stränge 1 und 2 aus Bild 2.

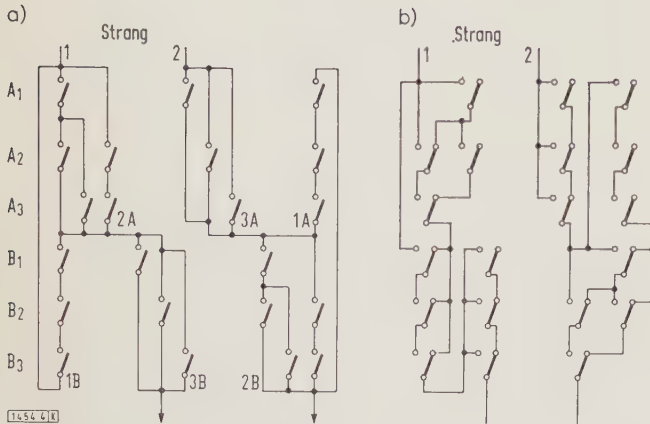


Bild 4. Kontakthanordnung zu Bild 2.

a) mit Arbeitskontakten, b) mit Wechselkontakten.

	0C				1C				2C				3C			
	0B	1B	2B	3B	0B	1B	2B	3B	0B	1B	2B	3B	0B	1B	2B	3B
0A																
1A			1	1					1	1	1	1	1A	1	1	1
2A			1	1					1	1	1	1	2A	1	1	1
3A	1	1	1	1	3A	1	1	1	1	1	1	1	3A	1	1	1

Bild 5. Dreisträngige 4-von-9-Schaltung, Grundmatrix mit Belegung von Strang 1.

			2		3	23		2	23	23	3	23	23	23
		1	12		1	123	1	12	123	123	13	123	123	123
	2	12	12	3	23	123	13	123	123	123	13	123	123	123
1	12	12	12	13	123	123	13	123	123	123	13	123	123	123

Bild 6. Dreisträngige 4-von-9-Schaltung, Belegung aller Stränge.

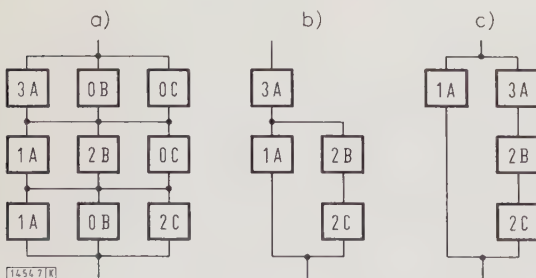


Bild 7. Blockschaltbild zu Strang 1 aus Bild 5 und Bild 6.

a) unmittelbar der Matrix entnommen, b) und c) optimal umgeformt.

Ruhestromschaltung arbeiten, bedeutet „und“ eine Parallelschaltung, „oder“ eine Reihenschaltung. Strang 1 hat also eine Reihenschaltung der beiden parallelen Blockgruppen 0 A; 3 B oder 2 A; 1 B. Der Block 2 A ist z. B. unterbrochen, wenn 2 Glieder der Gruppe A angesprochen haben, also eine 2-von-3-Schaltung in der Gruppe A. Der Block 0 A ist demnach stets unterbrochen, also gar nicht vorhanden.

Bild 4 zeigt die Anordnung der Kontakte der geforderten 4-von-6-Schaltung, und zwar in Bild 4 a mit Arbeitskontakten und in Bild 4 b mit Wechselkontakten.

Vollkommene dreisträngige Schaltung

Die Ableitung geschieht wieder über die Matrizenform, aber zweckmäßig über eine dreidimensionale Matrix.

Für eine dreisträngige 4-von-9-Schaltung z. B. teilt man die Anregeglieder in 3 Gruppen A, B und C ein. Die Matrix hat jetzt 4 Zeilen, 4 Spalten und 4 Schichten. Die Zeilen und Spalten beziffert man mit A und B, die Schichten, die nebeneinander gezeichnet werden müssen, mit C. Auch hier liegen rechts unter dem dicken Treppenzug wieder die Felder, die insgesamt mindestens 4 Anregungen entsprechen. In ihnen müssen mindestens zwei der drei Stränge bei Ruhebtrieb öffnen und bei Arbeitsstrombetrieb schließen.

Diese Matrix ist mit ihrer Bezifferung in Bild 5 dargestellt, ebenso sind die Felder schon bezeichnet, für die Strang 1 öffnen soll. Die Grundkonstellationen sind 3 A; 0 B; 0 C, 1 A; 2 B; 0 C oder 1 A; 0 B; 2 C. Durch zyklischen Tausch ordnet man dem Strang 2 die Grundkonstellationen 2 B; 0 C; 0 A, 1 B; 2 C; 0 A oder 1 B; 0 C; 2 A und dem Strang 3 die Grundkonstellationen 2 C; 0 A; 0 B, 1 C; 2 A; 0 B oder 1 C; 0 A; 2 B zu. Die Belegung mit allen Strängen ist in Bild 6 gezeigt. Alle Felder rechts unter dem dicken Treppenzug zeigen die Anregung von mindestens 2 Strängen.

Bild 7 zeigt das Blockschaltbild für Strang 1, und zwar in Bild 7 a in der Grundform, in Bild 7 b und 7 c in einer der möglichen Zusammenfassungen nach den bekannten Regeln der Schaltalgebra. In Bild 8 ist die Kontakthanordnung der Schaltung für den Strang 1 mit Wechselkontakten dargestellt.

Der Block 2 A kommt in Strang 2 und 3, der Block 2 B in Strang 1 und 3 und der Block 2 C in Strang 1 und 2 je einmal vor. Er entspricht einer 2-von-3-Schaltung, die für ein Glied 2 Kontakte, für die beiden anderen Glieder je einen Kontakt erfordert. Würde ein zweimal vorkommender Block in jedem Strang identisch aufgebaut, so wären insgesamt 2, 4 und 2 Kontakte je Relais erforderlich. Da in jeder Gruppe die einzelnen Anregungen unter sich gleichberechtigt sind, kann der Aufbau an sich gleicher Blöcke von Strang zu Strang zyklisch getauscht werden. Es sind dann insgesamt 2, 3 und 3 Kontakte je Relais notwendig. Die Gegenüberstellung zeigt Bild 9. Von dieser Vergleichsmäßigung der Kontaktzahl sollte man stets Gebrauch machen, da die Zahl der Kontakte je Relais begrenzt ist.

Die Matrizenableitung gilt für die Ruhe- und die Arbeitsstromschaltung gleicherweise. Erst bei der Zeichnung der Blockschaltung muß bei der Arbeitsstromschaltung die Funktion „und“ durch eine Reihenschaltung, die Funktion „oder“ durch eine Parallelschaltung dargestellt werden. Im übrigen gelten für die Umformung einer Ruhe- in eine

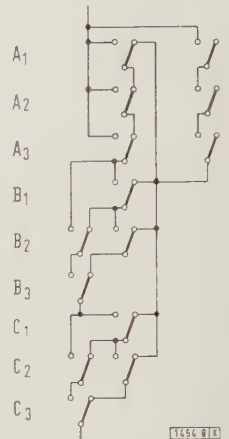


Bild 8. Kontakthanordnung für Strang 1 aus Bild 5 und 6.

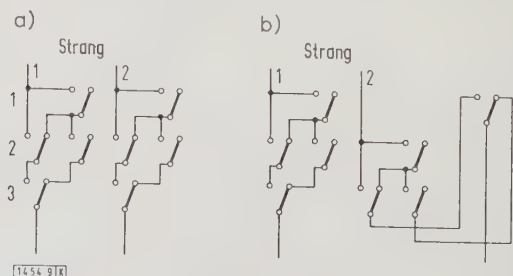


Bild 9. Sich wiederholende Schaltungsgruppe. a) identischer Aufbau, b) zyklisch getauscht.

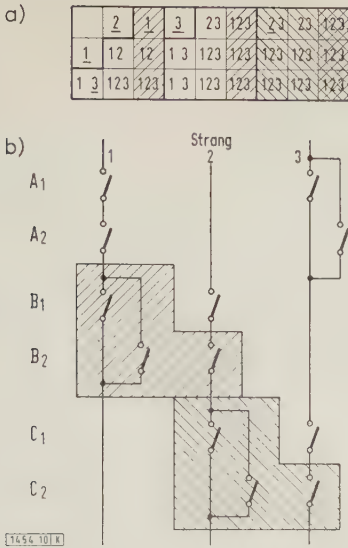


Bild 10. Übergang von einer 2-von-6- auf eine 2-von-4-Schaltung.
a) Belegung aller Stränge, b) Schaltung mit Arbeitskontakten.

Arbeitsstromschaltung die bekannten Regeln der Schaltungs algebra.

Ungleiche Kontaktgruppen

Wenn die Zahl der Anregeglieder nicht durch zwei oder drei teilbar ist, sind die Gruppen A, B (und C) verschiedenwertig im Gegensatz zu den bisher gezeigten Beispielen.

Sollte man z. B. eine dreisträngige 4-von-8-Schaltung entwickeln, so wären den Gruppen A und B wie bisher je 3 Anregeglieder, der Gruppe C aber nur 2 Glieder zuzuteilen. Die Darstellung in Bild 6 bliebe gültig; lediglich die Schicht 3C entfällt, da sie nicht zu verwirklichen ist. Damit entfallen auch die Blöcke, die durch die Schicht 3C bedingt sind.

In Bild 10 ist die Matrix und die Kontaktschaltung einer dreisträngigen 2-von-6-Schaltung dargestellt. Durch verschiedene Schraffur sind diejenigen Schaltelemente gekennzeichnet, die nacheinander bei einer 2-von-5- und einer 2-von-4-Schaltung zu entfallen haben.

Eine Schaltung mit ungleichen Kontaktgruppen kann natürlich in ihrem Bild nicht mehr symmetrisch wirken. Sie bleibt jedoch eine vollkommene Wertungsschaltung, in der die einzelnen Anregeglieder völlig gleichwertig sind.

Unvollkommene Wertungsschaltung

Es können Gründe vorliegen, eine Wertungsschaltung nicht vollkommen aufzubauen. Eine zweisträngige Schaltung mit 6 Elementen, für die man grundsätzlich ein 3-von-6-Verhalten fordert, arbeitet z. B., wenn alle 3 Elemente einer Gruppe ausfallen. Wenn nun die Anregeglieder eine besondere Energieversorgung benötigen und nur zwei Energieversorgungen vorhanden sind, dann wird jede je drei Anregeglieder bedienen. Fällt nun eine Energieversorgung aus, so werden drei Anregungen vorgetäuscht und die Wertungsschaltung spricht aktiv fehlerhaft an. Man wertet in diesem Fall drei Anregungen dann nicht, wenn sie zur selben Versorgungsgruppe gehören. In der Matrizendarstellung ergibt sich dann Bild 11. Eine vollkommene 3-von-6-Schaltung zeigt Bild 11 a, während eine unvollkommene Form Bild 11 b darstellt, bei der die Kon-

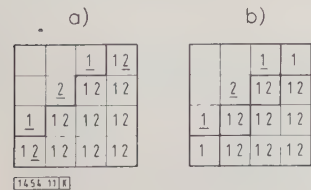


Bild 11. Zweisträngige Wertungsschaltung.
a) vollkommene Anordnung, b) unvollkommene Anordnung.

stellationen 3 A; 0 B und 0 A; 3 B nicht zur Anregung führen. In Bild 11 b sind jetzt zwei Treppenzüge eingezeichnet. Sie schließen die Zahlenkombinationen der Einzelanregungen ein, bei denen eine Gesamtanregung möglich, aber nicht sicher ist. Nach links oben liegt das Gebiet, in dem sicher nicht, nach rechts unten das Gebiet, in dem mit Sicherheit die Gesamtschaltung angeregt wird.

Der Treppenzug links oben bedeutet, daß eine Gesamtanregung bei 3 Einzelanregungen möglich ist. Er ist gleichzeitig ein Zeichen dafür, daß die aktive Fehlerwahrscheinlichkeit der vorliegenden Schaltung zwar nicht dem Koeffizienten, aber der Potenz nach einer 3-von-6-Schaltung entspricht. Der Treppenzug rechts unten bedeutet, daß eine Gesamtanregung bei 4 Einzelanregungen sicher ist. Die passive Fehlerwahrscheinlichkeit entspricht der einer 4-von-6-Schaltung. Dieses Beispiel sollte nur die Wirkung unvollkommener Wertungsschaltungen verdeutlichen. In der Praxis würde man diesen Weg nicht gehen, sondern von vornherein eine 4-von-6-Schaltung wählen.

Bei einer dreisträngigen Schaltung mit neun Elementen kann z. B. die je Relais benötigte Kontaktzahl zu groß sein, als daß eine vollkommene 4-von-9-Schaltung noch verwirklicht werden kann. Mit der Matrizendarstellung kann man dann ausprobieren, welche Schaltungsformen einerseits eine brauchbare Kontaktzahl ergeben, andererseits aber die Wünsche nach Sicherheit erfüllen. Neun Anregeelemente werden im allgemeinen nicht eingesetzt, weil eine entsprechend hohe Anforderung sowohl an die passive als auch an die aktive Sicherheit gestellt würde, sondern weil

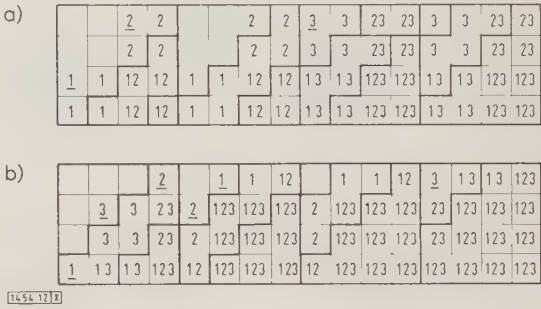


Bild 12. Zwei Formen unvollkommener dreisträngiger Wertungsschaltungen mit 9 Elementen.
a) Schaltung mit 2 Kontakten je Relais, b) Schaltung mit 3 Kontakten je Relais.

aus ganz anderen Gründen sowieso 9 Meßstellen vorhanden sind, und es falsch wäre, sie nicht alle zur Anregung heranzuziehen.

Eine mögliche Schaltung wäre zum Beispiel Strang 1 mit 2 A; 0 B; 0 C, Strang 2 mit 0 A; 2 B; 0 C und Strang 3 mit 0 A; 0 B; 2 C. Diese Schaltung benötigt höchstens zwei Kontakte je Relais.

Eine weitere Möglichkeit wäre Strang 1 mit 3 A oder 1 B; 1 C, Strang 2 mit 3 B oder 1 C; 1 A und Strang 3 mit 3 C oder 1 A; 1 B. Sie erfordert drei Kontakte je Relais.

Diese beiden Schaltungen sind in Bild 12 a und 12 b dargestellt. Die Treppenzüge zeigen, daß die erste Anordnung in bezug auf aktive Fehler einer 4-von-9-, in bezug auf passive Fehler einer 6-von-9-Schaltung entspricht. Für die zweite Anordnung gilt entsprechend eine 3-von-9- bzw. eine 5-von-9-Schaltung. Eine Bewertung dieses Ergebnisses soll hier nicht vorgenommen werden. Sie ist von Fall zu Fall zu treffen.

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, wie mit Hilfe einer aus der Schaltungslehre bekannten Matrizendarstellung der Entwurf zwei- und dreisträngiger Wertungsschaltungen vorgenommen werden kann. Mit der gleichen Darstellung kann untersucht werden, welche aktiven und passiven Fehlerwahrscheinlichkeiten unvollkommene Wertungsschaltungen ergeben.

Über die günstigste Gestaltung von Schwinganker-Rasierermotoren

Von Adolf Wilhelm Mohr, Künzelsau/Württ.*)

DK 621.313.39-24

Aufbau und Wirkungsweise

In den letzten Jahren wurden die Elektrorasierer immer weiter vervollkommen, so daß sie sich mit wachsendem Erfolg durchsetzen konnten. Wegen der billigen Herstellungsweise und der Störungsfreiheit hat der Schwingankermotor als Scherkopftrieb für Trockenrasierer trotz seines schlechten Wirkungsgrades den Universalmotor schneller verdrängt, als man vermutet hatte. In Bild 1 sind einige der vielen Typen von Trockenrasierern wiedergegeben, die nach dem Schwingankerprinzip arbeiten und sich bereits bewährt haben.

Während zum Antrieb schwingender Schermesser mit einem Universalmotor die Rotationsbewegung des Ankers erst über einen Exzenter in eine Translationsbewegung übersetzt werden muß, kann der Anker eines Schwingankermotors die Messer unmittelbar antreiben. Bei den Schwingankerantrieben werden die Hubmagnet- und die Drehmagnetantriebe unterschieden. Bei der erstgenannten Art bewegt sich der Anker hauptsächlich in Richtung der Kraftlinien. Da die Kraftwirkung umgekehrt proportional dem Quadrat der Luftspaltlänge ist, müssen diese Systeme

Aus Gl. (1) ergibt sich, daß das Schwingungssystem um so belastungsunabhängiger wird, je größer M_m und M_C im Vergleich zu M_R werden. Da bei der Rückbewegung des Ankers die Schnittarbeit allein von der Federkraft aufgebracht werden muß, ist in jedem Fall das Federmoment dem magnetischen Moment anzupassen. Für eine zweckmäßige Bemessung ergibt sich die Frage, welches Feldpol- und Ankerprofil zu wählen ist, um aus einem vorgegebenen Luftspaltvolumen das Maximum an Leistung während einer Ankerschwingung herauszuholen.

Ausführliche Untersuchungen haben gezeigt, daß die Leistung von kleinen Drehmagnetsystemen nur durch Abänderung des Feldpolprofils und entsprechendes Anpassen der Rückstellfeder um 70 bis 90 % gesteigert werden konnte, und daß es möglich ist, eine sinusförmige Schwingung des Ankers zu erreichen, ohne das System auf Resonanz abstimmen zu müssen. Um eine möglichst große Belastungssteifigkeit zu erreichen, werden das Trägheitsmoment des Ankers und das Rückstellmoment so gewählt, daß die Betriebsfrequenz und die Eigenfrequenz möglichst unterschiedlich ist.

Im folgenden wird das Leistungsverhalten von Systemen mit verschiedenen Polprofilen angegeben und daraus das günstigste Feld- und Ankerprofil hergeleitet.

Kraftwirkung auf den Drehmagnetanker

Am übersichtlichsten wird die Kraftwirkung auf den Anker eines Drehmagneten aus der Änderung der magnetischen Energie im Luftspalt hergeleitet. Ganz allgemein gilt für die magnetische Kraft

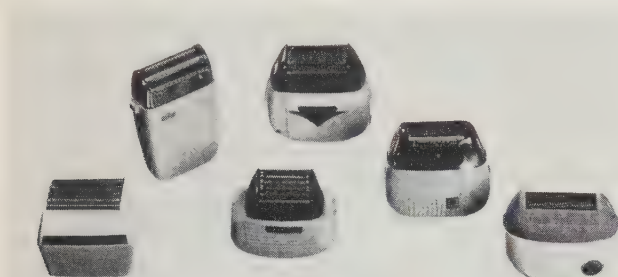
$$P = -dW/d\alpha \quad (2)$$

Mit $W = \frac{1}{2} \cdot LI^2$ und $L = w^2 A$ erhält man ohne Berücksichtigung des Vorzeichens

$$P = \frac{1}{2} I^2 w^2 \frac{dA}{d\alpha} \quad (3)$$

wenn man mit α die Winkelkoordinate des Ankers, W die magnetische Energie im Luftspalt, I den Erregerstrom, L die Induktivität der Erregerspule, w die Windungszahl der Erregerspule und mit A den Luftspaltleitwert bezeichnet.

Nach Gl. (3) ist für die Größe der Kraft die Änderung des Leitwertes multipliziert mit dem Quadrat des Erregerstromes maßgebend. Um diese möglichst groß zu erhalten, kann also nur dann ein Profil mit unstetigem Luftspalt, d. h.



1453.1 K+

Bild 1. Trockenrasierer mit Schwingankerantrieb.

mit einem Anschlag für den Anker, der meist als Gummipuffer ausgeführt ist, versehen sein. Dieses Anschlagen führt unvermeidlich zu Vibrationen und Geräuschen.

Für möglichst vibrationsarme Schwingankerantriebe verwendet man daher Drehmagnetsysteme, bei denen sich der Anker am Erregerpol vorbei bewegt. Da hierbei jedoch nur eine Komponente der magnetischen Kraft die Bewegung bewirkt, können diese Systeme im Vergleich zu den Hubmagnetantrieben wohl vibrationsärmer, aber nur mit schlechterem Wirkungsgrad gebaut werden. Dieser Tatbestand erfordert, um einen leistungsstarken Antrieb zu schaffen, eine besonders günstige Gestaltung des Drehmagnetantriebes.

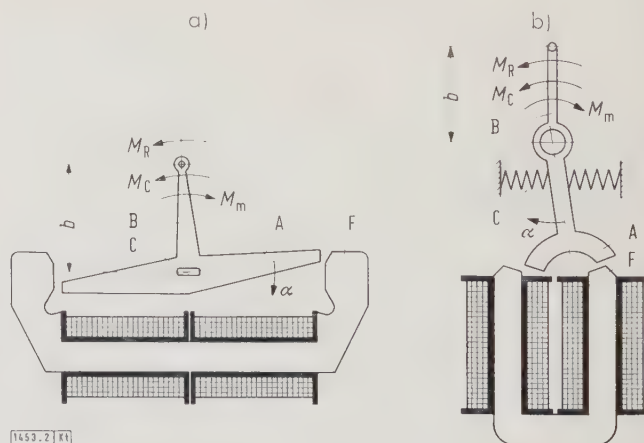
Um die Kraftwirkungen auf den Schwinganker im Wechselfeld leichter übersehen zu können, sind in Bild 2 zwei Ausführungsformen von Drehschwingern in Ruhelage schematisch dargestellt. Die Pfeile zeigen die Richtung der am Anker angreifenden Momente an. Der Anker A wird durch das magnetische Moment M_m zu den Erregerpolen F hingezogen und eine Feder C gespannt, die bei Abnahme des magnetischen Flusses das Rückstellmoment M_C liefert.

Im Falle des Bildes 2a wird eine Torsionsblatfeder, im Falle Bild 2b eine Schraubenfeder gespannt. Das Reibungsmoment M_R , in das auch die Schnittleistung des Scherkopfes mit einbezogen werden kann, wirkt hemmend, wobei ein Anteil dieses Momentes bei jeder Bewegung zwischen den Werten der Haft- und Gleitreibung schwankt. Das beschleunigende Moment M_B setzt sich aus der Summe der Momente

$$M_B = M_m - M_C - M_R \quad (1)$$

zusammen. Alle Momente in Gl. (1) sind Funktionen des Ankerstellungswinkels α , und da α abhängig von der Zeit ist, somit Funktionen der Zeit.

*) Dr.-Ing. A. W. Mohr ist technischer Leiter der Ziehl-Abegg oHG in Künzelsau/Württ.



1453.2 K1

Bild 2. Schwingankerantriebe.

a) Anker mit Torsionsblatfeder, b) Anker mit Schraubenfeder.

M_R	Reibungsmoment	A	Anker
M_m	magnetisches Moment	B	Abtriebshebel
M_C	Federmoment	C	Feder
α	Winkelkoordinate	F	Erregerpol

größter Leitwertsänderung mit Erfolg gewählt werden, wenn während der Ankerbewegung der Strom konstant bleibt. Ändert er sich während der Ankerbewegung, so muß der günstigsten Profilgestaltung stets das Produkt aus Leitwertänderung und dem Quadrat des Erregerstromes zugrunde gelegt werden.

Der Übersichtlichkeit wegen ist in Bild 3 die Drehbewegung des Ankers in eine geradlinige Bewegung mit der Wegkoordinate x übergeführt. Die Kernfrage des Problems ist dabei, welches Profil $y = f(x)$ zu wählen ist, um die Kraftwirkung möglichst groß zu erhalten. Aus Bild 3 ergibt sich der Leitwert A des Luftspaltes zwischen Feld- und Ankerprofil (die Randfelder sollen hierbei unberücksichtigt bleiben) mit l_1 der Breite des Magneten zu

$$A = \mu \int_x^{x+b_p} \frac{l_1 d\xi}{y} \quad (4)$$

Somit kann die Kraftwirkung durch

$$P = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r w^2 I^2 \frac{d}{dx} \int_x^{x+b_p} \frac{l_1 d\xi}{y} \quad (5)$$

ausgedrückt werden, wobei $\mu = \mu_0 \mu_r$ mit $\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-8}$ Vs/A cm die absolute Permeabilität des Vakuums ist.

Für die weiteren Untersuchungen ist es zweckmäßig, die Gleichung für die Kraft in einer anderen Form darzustellen. Allgemein gilt

$$L = \frac{w \Phi}{I} = w^2 \cdot A, \quad (6)$$

wenn mit Φ der Windungsfluß bezeichnet wird. Es wird also

$$L = \mu_0 \mu_r w^2 \int_x^{x+b_p} \frac{l_1 d\xi}{y} \quad (7)$$

Würde die Luftspaltbreite δ über die ganze Länge τ einen Minimalwert haben, so würde sich bei den Abmessungen nach Bild 3 eine Induktivität ergeben von

$$L_0 = \mu_0 \mu_r w^2 \frac{l_1 b_p}{\delta} \quad (8)$$

Wenn man weiter als Hilfsgröße

$$\sigma = \frac{\delta}{b_p} \int_x^{x+b_p} \frac{d\xi}{y} \quad (9)$$

eingführt, so erhält man für Gl. (5)

$$P = \frac{1}{2} I^2 L_0 \frac{d\sigma}{dx} \quad (10)$$

Der Einfluß der verschiedenen Profile wird also in dieser Darstellung lediglich durch die Größe des Stromes und den

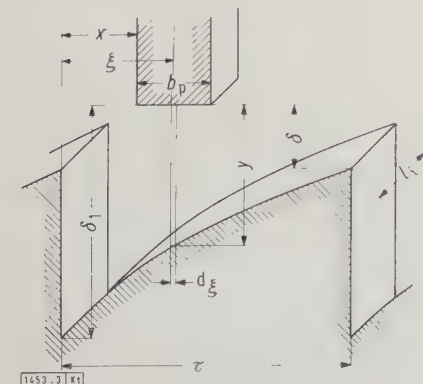


Bild 3. Rechnerische Erfassung der Profilkurven für Feldpole und Anker.

Differentialquotienten $d\sigma/dx$ bestimmt. Gl. (10) gilt selbstverständlich auch bei veränderlichem Erregerstrom während der Ankerbewegung. In der Praxis wird sich bei den in Frage kommenden Schwingankersystemen sowohl Fluß als auch Strom während der Ankerbewegung ändern. Im folgenden werden beide Fälle (eingepprägter Fluß und eingepprägter Erregerstrom) getrennt behandelt.

Eingepprägter Strom

Der Strom sei konstant und der Fluß ändere sich während der Bewegung (eingepprägter Strom). Dieser Fall liegt vor, wenn der ohmsche Widerstand sehr viel größer ist als der induktive Widerstand, d. h. wenn die Stromaufnahme hauptsächlich durch den ohmschen Widerstand bestimmt wird und die Induktivitätsschwankungen infolge des schwingenden Ankers nur sehr wenig ins Gewicht fallen.

Eingepprägter Fluß

Der Fluß sei konstant und der Erregerstrom ändere sich bei der Bewegung. Dieser Fall liegt vor, wenn der ohmsche Widerstand vernachlässigbar klein ist im Vergleich zum induktiven Widerstand. Damit ist durch die starre Spannung

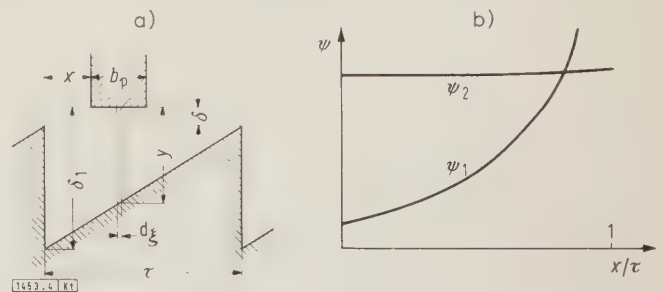


Bild 4. Rechnerische Erfassung des geradlinigen Feldpol-Profils

a) Feldprofil, b) Zugkraft abhängig vom Weg.

der Fluß in dem System eingepragt, und die Stromaufnahme wird durch die Induktivitätsschwankungen infolge der Ankerschwingungen bestimmt.

Für den Fall des eingepprägten Flusses kann die Kraftwirkung noch in anderer Form dargestellt werden. Die Gleichung

$$I = U/\omega L \quad (11)$$

und Gl. (7) und (8) in Gl. (10) eingesetzt, liefert die Kraftwirkung bei eingepprägtem Fluß

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{\omega^2 L_0} \cdot \frac{d\sigma}{dx} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \quad (12)$$

Mit Hilfe der Gl. (10) und (12) können also die Kraftwirkungen beider Fälle leicht übersehen werden.

Für die Untersuchungen verschiedener Feldprofile ist es zweckmäßig, die Kraft in zwei Faktoren zu zerlegen. Der erste Faktor P_0 soll die elektromagnetischen Größen und die Hauptabmessungen enthalten und die Einheit einer Kraft haben. Dieser Faktor bleibt also während der Bewegung konstant. Der zweite Faktor soll nur die geometrischen Abmessungen des Luftspaltes und die Ankerstellung berücksichtigen und dimensionslos sein.

Man erhält demnach bei konstantem Strom

$$P_{01} = \frac{1}{2} I^2 \frac{L_0}{\tau} \quad \text{und} \quad \psi_1 = \tau \frac{d\sigma}{dx} \quad (13)$$

und bei konstantem Fluß

$$P_{02} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{\omega^2 L_0 \tau} \quad \text{und} \quad \psi_2 = \frac{\tau}{\sigma^2} \cdot \frac{d\sigma}{dx} \quad (14)$$

Mit Hilfe der beiden Faktoren ψ_1 und ψ_2 lassen sich nun die Kraftwirkungen bei verschiedenen Feldprofilen untersuchen.

Der Rechnungsgang ist im folgenden für die mathematisch leicht darstellbaren Funktionen der geradlinigen Luft-

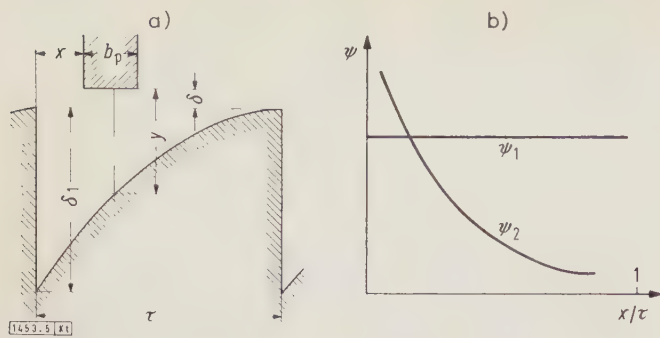


Bild 5. Rechnerische Erfassung des hyperbelförmigen Feldpol-Profils.
a) Feldprofil, b) Zugkraft abhängig vom Weg.

spaltänderung, hyperbelförmigen Luftspaltänderung und un-
stetigen Luftspaltänderung durchgeführt.

1. Geradlinige Luftspaltänderung

Für das Feldprofil nach Bild 4a gilt die Gleichung der Geraden

$$y = \delta_1 - (\delta - \delta_1) \frac{\xi}{\tau} = \delta_1 \left(1 - \varepsilon \frac{\xi}{\tau}\right), \quad (15)$$

mit

$$\varepsilon = 1 - \frac{\delta}{\delta_1}. \quad (16)$$

Man erhält damit

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dx} &= \frac{\delta}{b_p} \cdot \frac{d}{dx} \int_x^{x+b_p} \frac{d\xi}{y} = \frac{\delta}{b_p} \left[\frac{1}{\delta_1 \left(1 - \varepsilon \frac{x+b_p}{\tau}\right)} \right] = \\ &= \frac{1}{\delta_1 \left(1 - \varepsilon \frac{x}{\tau}\right)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Ferner ist

$$\psi_1 = \tau \frac{d\sigma}{dx} = \frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{\left(1 - \frac{x+b_p}{\tau}\right) \cdot \left(1 - \varepsilon \frac{x}{\tau}\right)} \quad (18)$$

und man erhält

$$\sigma = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\tau}{b_p} \ln \left(\frac{1 - \varepsilon \frac{x}{\tau}}{1 - \varepsilon \frac{x+b_p}{\tau}} \right). \quad (19)$$

Damit kann auch die Größe ψ_2 berechnet werden.

Der Kraftverlauf in Abhängigkeit von der Ankerbewegung ist in Bild 4b dargestellt. Man sieht sehr deutlich, daß ψ_2 (Zugkraft bei konstantem Fluß) nahezu über den ganzen Weg konstant ist, während ψ_1 (Zugkraft bei konstantem Strom) sehr rasch mit dem Weg ansteigt.

2. Hyperbelförmige Luftspaltänderung

Für das Feldprofil nach Bild 5a gilt die Gleichung

$$\frac{\delta}{y} = \frac{\delta}{\delta_1} + \left(1 - \frac{\delta}{\delta_1}\right) \frac{\xi}{\tau} = 1 - \varepsilon + \varepsilon \frac{\xi}{\tau}. \quad (20)$$

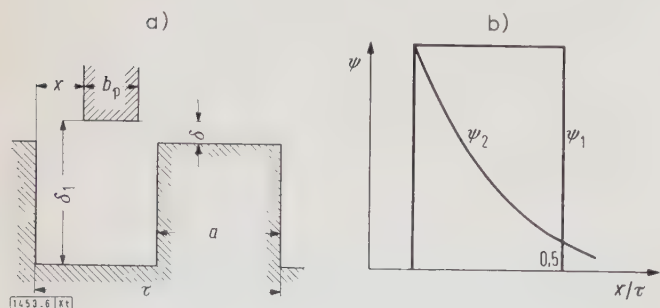


Bild 6. Rechnerische Erfassung des un stetigen Feldpol-Profils.
a) Feldprofil, b) Zugkraft abhängig vom Weg.

In diesem Fall wird für $\psi_1 = \varepsilon$:

$$\sigma = 1 - \varepsilon + \varepsilon \left(\frac{x}{\tau} + \frac{b_p}{2\tau} \right). \quad (21)$$

Die Zugkraft bei konstantem Strom ist also konstant, während die Zugkraft bei konstantem Fluß stark abnimmt.

3. Un stetige Luftspaltänderung

Bei einem Profil nach Bild 6a muß die Berechnung intervallweise durchgeführt werden. Für $0 \leq \xi \leq (\tau - a)$ bei $y = \delta_1$ und $(\tau - a) \leq \xi \leq \tau$ bei $y = \delta$ erhält man

$$\psi_1 = \tau \frac{\delta}{b_p} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{\delta_1} \right) = \varepsilon \frac{\tau}{b_p}. \quad (22)$$

In Bild 6a ist das Profil und in Bild 6b der Verlauf der magnetischen Kraft dargestellt. Die Zugkraft wird hier also bei Systemen mit eingepägtem Strom groß. Äußerst ungünstig ist dieses Profil für den Fall des eingepägten Flusses, wie die Ermittlung von ψ_2 zeigt.

$$\sigma = \frac{\delta}{b_p} \int_x^{x+b_p} \frac{d\xi}{y} = 1 + \varepsilon \frac{x - \tau + a}{b_p}, \quad (23)$$

d. h. die Zugkraft fällt bei eingepägtem Fluß nach einer Hyperbel zweiten Grades ab.

Die Frage ist nun, welches Profil zu wählen ist, wenn sowohl Fluß als auch Strom sich während der Ankerbewegung ändert. Bei Schwingankerantrieben für Trockenrasierer ist der $\cos \varphi$ etwa 0,25 bis 0,30, d. h. also, man muß besser mit konstantem Fluß als mit konstantem Strom rechnen.

Der un stetige Luftspalt hat bei den gebräuchlichen Rasierern mit Schwingankerantrieben einen starken Zugkraftabfall während der Ankerbewegung zur Folge. Wenn bei diesen Systemen

eine konstante Zugkraft angestrebt wird — man erhält dann größtmögliche Leistung bei sinusförmiger Schwingung —, so muß ein teils geradliniges teils hyperbelförmiges Profil gewählt werden. Die Versuche haben gezeigt, daß eine Kombination verschiedener Profile, wie sie in Bild 7 gezeigt ist, die gewünschten Forderungen erfüllt. Als Polform des Feldpaketes wird der geradlinig sich ändernde Luftspalt mit einem hyperbolischen Einlauf in den konstanten Luftspalt gewählt. Auf diese Art wird der Anstieg der Kraft nach Bild 4 durch das Abfallen der Kraft nach Bild 5 voll kompensiert.

Es erweist sich ein Steigungswinkel der Geraden von etwa 30° als günstig. Die Schwingamplitude liegt in Bild 7 zwischen den beiden senkrechten Linien.

Die Auswirkung eines un stetigen Luftspaltes mit einer während der Ankerbewegung abfallenden Zugkraft zeigt die stroboskopische Betrachtung der Ankerschwingung mit etwa der in Bild 8 dargestellten Schwingungsform. Die Grundwelle des Erregerstromes i ist gestrichelt eingezeichnet. Der Anker wird mit zunehmendem Strom angezogen. Während der Bewegung nimmt nun die Induktivität der Erregerwicklung entsprechend der großen Leitwertänderung sehr stark zu, dadurch wird der Strom und somit die Kraftwirkung kleiner, und der Anker bewegt sich wieder von den Polen weg. Die Folge davon ist, daß der Strom wieder zunimmt, so daß der Anker erneut angezogen wird. Der Stromverlauf zeigt dabei ein ähnliches Bild wie die Schwingungsform. Der Einschnitt h in der Schwingungsform führt, wenn seine Größe einen bestimmten Wert überschreitet, zu einer merklichen Verschlechterung der Schnittleistung und der Schnittqualität des Trockenrasierers, weil die Barthaare vorübergehend nur eingeklemmt werden. Man kann

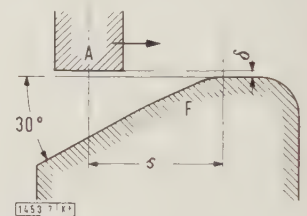


Bild 7. Günstigstes Profil der Feldpole.

A Anker F Feldpol
 δ Luftspalt s Amplitude

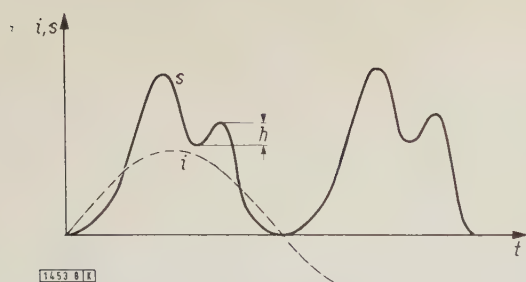


Bild 8. Schwingungsform der Ankerbewegung bei unstetigem Verlauf des Feldprofils.

i Erregerstrom s Amplitude h Einschnitttiefe

natürlich durch Vergrößerung der Rückstellkraft und damit Verkleinerung der Amplitude diese Erscheinung größtenteils unterdrücken, nur dürfte diese Maßnahme nicht sehr sinnvoll sein, weil sie auf Kosten des Wirkungsgrades geht.

Bei der nach diesen Richtlinien ermittelten günstigsten Profilgestaltung wird durch den konstanten Kraftverlauf bei konstantem Strom und Fluß eine quadratisch sinusförmige Schwingung bei Wechselstromerregung erreicht. Auf diese Art erhält man eine genügend genau sinusförmige, jedoch wesentlich belastungsunabhängigere Schwingungsform, als wenn man von einer Resonanzabstimmung ausgeht.

Nachdem nun die Richtlinien festliegen, nach denen ein Feld- und Ankerprofil gestaltet werden kann, soll noch eine weitere Möglichkeit der Veränderung der Schwingankerleistung, die Länge des Abtriebshebels, mit in die Überlegungen eingeflochten werden.

Das dreidimensionale Belastungsdiagramm

Je nach Belastung des Schwingankermotors ergibt sich eine genau bestimmbare günstigste Länge des Abtriebshebels, wobei man zu unterscheiden hat, ob das Schwingankersystem mit konstanter Belastung im Wirkungsgradmaximum betrieben werden soll, oder ob eine möglichst große Belastungssteifigkeit verlangt wird. Da bei Schwingankerantrieben die Masse des Abtriebshebels bei jeder Schwingung mitbeschleunigt werden muß, ergibt sich bei einer bestimmten Belastung ein Maximum der Amplitude und damit der Leistung.

In Bild 9 ist ein dreidimensionales Belastungsdiagramm wiedergegeben. In der Grundebene ist die Belastung R des Schwingankers und die Länge des Abtriebshebels b aufgetragen; senkrecht dazu ist die Amplitude s eingezeichnet. Das Diagramm kann rasch an Hand der beiden Kennlinien k_1 [$s = f(R)$] bei konstanter Länge des Abtriebshebels und k_2 [$s = f(b)$] bei konstanter Belastung in dem in Frage kommenden Bereich ausgewertet werden.

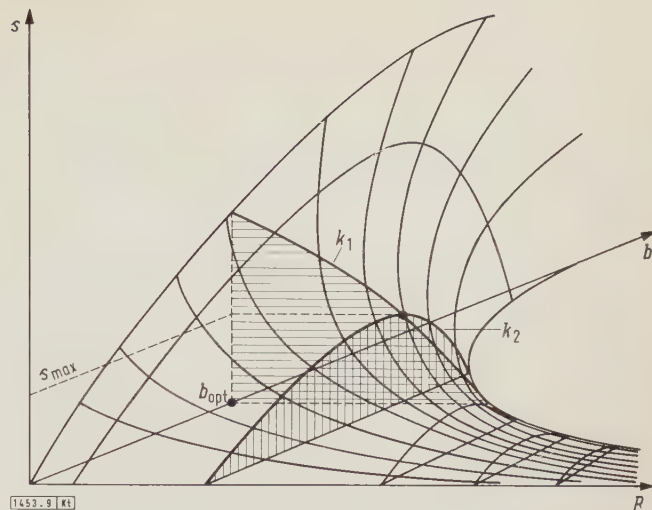


Bild 9. Dreidimensionales Belastungsdiagramm für einen Schwinganker-Antrieb.

s Amplitude
 b Länge des Abtriebshebels
 k_1 Kennlinie ($s = f(R)$)
 k_2 Kennlinie ($s = f(b)$)
 R Belastung

Alle Schnitte parallel zur sR -Ebene geben die Belastungsabhängigkeit bei verschiedenen langen Abtriebshebeln an, während die Schnitte parallel zur sb -Ebene Auskunft geben, ob die Leistung durch Verändern der Länge des Abtriebshebels noch gesteigert werden kann.

Mit diesem Belastungsdiagramm ist man also in der Lage, zu entscheiden, ob bestimmte Forderungen von einem vorliegenden Schwingankersystem erfüllt werden können, oder welche konstruktiven Veränderungen dazu durchgeführt werden müssen. Auf diese Art läßt sich das Verwendungsgebiet eines Schwingankermotors sehr leicht übersehen und abgrenzen.

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, warum man besonders bei Schwingankerantrieben mit Drehmagneten an einer Leistungssteigerung interessiert ist. Die Möglichkeiten einer Leistungssteigerung werden diskutiert. Man kann durch verschiedene Gestaltung des Feldpol- und Ankerprofils den Verlauf und die Größe der Zugkraft in weiten Grenzen beeinflussen. Aus bekannten Zusammenhängen wird das günstigste Feldprofil hergeleitet, mit dem bei maximaler Leistung eine sinusförmige Schwingung erreicht wird. Zum Schluß wird ein dreidimensionales Belastungsdiagramm angegeben, mit dem es möglich ist, sehr rasch die Verwendungsmöglichkeit eines vorgegebenen Schwingankersystems zu ermitteln.

Das Verhalten von elektrischen Schaltungen in großer Höhe

DK 621.317.333.6 : 621.31

Während die elektrische Festigkeit bei Höhen bis zu 20 km über der Erdoberfläche schon ausreichend untersucht und bekannt ist, sind wenig Informationen über größere Höhen, z. B. in dem Bereich zwischen 300 und 600 km, vorhanden¹⁾. Es besteht aber im Hinblick auf die Entwicklung von Flugkörpern ein dringendes Bedürfnis, diesen Höhenbereich näher zu untersuchen.

Bei 20 km Höhe beträgt der Luftdruck etwa 42 Torr. Die Überschlagnspannung sinkt nach dem Paschenschen Gesetz in Abhängigkeit von dem Produkt aus Druck und Schlagweite. Koronaansatz- und Überschlagnspannung, z. B. eines Steckers, sind wie bei normalem Luftdruck eindeutig zu unterscheiden. Sinkt der Luftdruck mit größerer Höhe, so wird das Gebiet der kleinstmöglichen Überschlagnspannung erreicht. Eine weitere Abnahme des Luftdruckes, z. B. auf

etwa $5 \cdot 10^{-3}$ Torr bei 900 km Höhe, zeigt demgegenüber wieder eine wesentlich größere elektrische Festigkeit.

Das Gebiet der kleinstmöglichen Überschlagnspannung ist bei den heutigen Konstruktionen etwa in dem Höhenbereich zwischen 300 und 600 km vorhanden. Sie beträgt im homogenen Feld in Luft nach theoretischen Ableitungen etwa 346 V. Aus Versuchen wurden jedoch 275 V bestimmt. Der Elektrodenabstand spielt in dem genannten Gebiet keine entscheidende Rolle mehr, und Koronaansatz- und Durchschlagspannung sind nicht mehr eindeutig zu trennen. Aus Sicherheitsgründen sollte im Betrieb eine Spannung von 150 V Scheitelwert nicht überschritten werden.

Verbesserungen und die Möglichkeit, höhere Spannungen anzuwenden, sind nur durch besondere Maßnahmen, z. B. bei Verwendung von gasfesten Kabeln oder umgossenen Elektroden möglich. Die Klärung des Einflusses der Sonnenbestrahlung und der kosmischen Höhenstrahlung verlangt noch weitere Untersuchungen.

Au

¹⁾ Nach Coats, A. L.: Performance of electrical connectors at high altitude. Electr. Engng. Bd. 80 (1961) H. 1, S. 67-69; 3 B., 1 Qu.

RUNDSCHAU

DK 621.314.57.018.33

Die wechselstromseitigen Spannungsharmonischen eines Stromrichters bei idealer Sperrresonanz des Netzes. Nach Rumpel, D.: Arch. Elektrotechn. Bd. 46 (1961) H. 1, S. 47–58; 12 B., 7 Qu.

Bei der Planung großer Stromrichteranlagen taucht häufig die Frage auf, welche Rückwirkungen die im Betrieb auftretenden Stromharmonischen auf den Netzspannungsverlauf ausüben, insbesondere wenn das Netz bei der Frequenz einer der Harmonischen eine Sperrresonanz aufweist. Der Verfasser erwähnt zunächst verschiedene rechnerische und graphische Verfahren zur Ermittlung der Wechselspannungsharmonischen. Auf Grund eines weitergehenden Ansatzes versucht er, die Spannungsharmonischen bei Sperrresonanz zu ermitteln, wobei insbesondere die Steuerung des Stromrichters und der Einfluß der Spannungsharmonischen auf den Kommutierungsvorgang berücksichtigt werden. Er zeigt, welche Höhe die Spannungsharmonische auf der Wechselstromseite eines gesteuerten Stromrichters erreicht, wenn die zugehörige Stromharmonische durch eine Netzresonanz völlig gesperrt wird. Zur Vereinfachung der Rechnung wird angenommen, daß das Wechselstromnetz einschließlich Stromrichtertransformator bei der jeweils betrachteten harmonischen Frequenz eine unendlich hohe Sperrimpedanz aufweist, während es sich für alle anderen harmonischen Frequenzen wie eine Induktivität verhält. Für den Stromrichter wurde vollkommene Drosselglättung des Gleichstromes und Verlustfreiheit der Ventile vorausgesetzt.

In der Stromrichterschaltung wird der kommutierende Strom bei Sperrfrequenz — ebenso wie der kommutierende Grundschwingungsstrom — von der Induktivität begrenzt und weist ein vom Zündzeitpunkt abhängiges Gleichstromglied auf. Auf Grund der Kommutierungsbedingungen des Stromrichters ist es möglich, den Verlauf dieses Stromes bei völliger Sperrung zu berechnen. Damit ist gleichzeitig die Höhe der Sperrkreis-Spannung festgelegt. Die Fourier-Koeffizienten und der Verlauf des kommutierenden Kurzschlußstromes hängen proportional von dessen Scheitelwert und nach verhältnismäßig komplizierten transzendenten Funktionen vom Steuerwinkel und vom Überlappungswinkel ab. Für die Rechnung wurde daher eine Hilfsfunktion eingeführt.

Die Stromharmonischen in den Ventilkreisen sind Dauerströme und können daher wie übliche einfrequente Wechselströme behandelt werden. Die errechneten bezogenen Sperrkreis-Spannungswerte gelten für alle Stromrichterschaltungen, unabhängig von Pulszahl und primärer Phasenanzahl. Bei Saugdrossel- und Schwenkschaltungen gelten sie allerdings nur solange, wie die einzelnen Kommutierungsgruppen gleich belastet sind und sich nicht gegenseitig in ihrer Kommutierung beeinflussen. Es zeigt sich, daß der auftretende Wert der Spannungsharmonischen stark vom Verhältnis der Stromrichterleistung zur Grundschwingungs-Kurzschlußleistung im Kommutierungskreis, vom Zündwinkel und von der Ordnungszahl der gesperrten Harmonischen abhängt. Die Spannungsharmonischen gehen auch bei völliger Sperrung der zugehörigen Stromharmonischen und idealer Drosselglättung des Gleichstromes nicht gegen Unendlich, sie können aber bei großem Zündwinkel, selbst bei höheren Ordnungszahlen, noch Werte annehmen, welche die Grundschwingungsspannung übersteigen. Hlk

DK 621.316.933 : 621.315.2

Schutz von Kabeln in Wasserstollen gegen Blitzschäden. Nach Foretay, E., u. Ruchet, R.: Bull. Schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 52 (1961) H. 2, S. 33–39; 6 B., 1 Taf., 18 Qu.

Die Verfasser berichten über Blitzschäden an einem Telefon- und Signalkabel ohne äußeren Metallmantel, das im Tessin in einem etwa 5 km langen Wasserstollen verlegt ist. Dieser Stollen befindet sich in einer Tiefe zwischen 200 bis 1000 m unter der Erdoberfläche, so daß eine direkte Einwirkung des Blitzstromes auf das im Wasser befindliche Kabel unmöglich scheint. Trotzdem wurde ein Jahr nach der Verlegung des Kabels eine Isolationsminderung und nach weiteren zwei Jahren ein Defekt an 31 der insgesamt 48 Adern festgestellt. An sehr vielen Stellen waren der äußere Kunststoffmantel und die Aderisolation punktiert, wozu Stoßspannungen von etwa 300 kV Scheitelwert erforderlich sind.

Als Ursache der Beschädigung sind zwei Möglichkeiten denkbar:

1. Direkter Blitzschlag in ein Kabelende. An der Einschlagstelle wird das Potential von Kabelseele und Erdboden angehoben. Während sich diese Anhebung längs der Kabelseele nahezu ungedämpft fortpflanzt, nimmt das Potential des Erdbodens mit wachsender Entfernung von der Einschlagstelle schnell ab. Von einer bestimmten Entfernung ab kann dann die Potentialdifferenz zwischen Kabelseele und Erdboden die Stoßfestigkeit der dazwischen befindlichen Isolation übersteigen, so daß ein Durchschlag eintritt.
2. Fortpflanzung des Blitzstroms durch den Fels. In felsigem Erdreich, besonders längs Verwerfungsspalten, kann infolge niedrigen Erdwiderstandes eine Konzentration des Blitzstroms stattfinden, so daß sich dieser längs einer gut leitenden Bahn fortpflanzt. Wird die Nähe des Kabels erreicht, tritt ein Durchschlag zur Ader ein.

Die Eigenart der gefundenen Durchschläge läßt vermuten, daß die unter 2 genannte Möglichkeit als Ursache der Beschädigung in Frage kommt.

Zum Schutz des Kabels werden einige Vorschläge gemacht, und im Versuch wurden verschieden ausgebildete Metallmäntel erprobt. Eine Umhüllung mit zwei gegenständig aufgetragenen Kupferbändern oder ein Kabel mit einem Kupfer-Wellmantel ergibt einen sehr niedrigen Spannungsabfall, der selbst bei hohen Blitzströmen die Stoßfestigkeit der Kabelisolation nicht übersteigt. Au

DK 621.313.33.042

Analytische Behandlung des magnetischen Kreises von Asynchronmaschinen. Nach Weh, H.: Arch. Elektrotechn. Bd. 46 (1961) H. 1, S. 27–40; 11 B., 2 Qu

Ein für die Berechnung des Magnetisierungsbedarfes sehr wichtiges Teilproblem des magnetischen Kreises ist die Berücksichtigung des Feldverlaufes im Luftspalt. Die herkömmlichen Verfahren zur Bestimmung des Magnetisierungsstromes beruhen entweder auf ersten Näherungen und nicht immer ausreichend begründeten Annahmen, oder es werden teilweise aus Versuchen ermittelte Faktoren verwendet, deren Zuverlässigkeit in Grenzfällen nicht gesichert ist. Besonders unbefriedigend ist auch die ungenügende Berücksichtigung des Jochinflusses auf die Feldform. Zur Lösung dieser Aufgabe mit Differentialgleichungen muß die Magnetisierungskennlinie des Eisens analytisch nachgebildet werden. Ein besonderer Vorzug des analytischen Verfahrens ist neben der einfachen Anwendung seiner Ergebnisse der erheblich vergrößerte Informationsgehalt durch die allgemeinere und umfassendere Darstellungsmöglichkeit der Ergebnisse.

Eine geeignete Ersatzfunktion für die Wechselstrom-Magnetisierungskurve des Eisens wird unter den Gesichtspunkten ausgewählt, daß die Nachbildung eine ausreichende Genauigkeit vermittelt und im Hinblick auf die durchzuführenden Rechnungen auf geschlossene Lösungen führt. Bei vorgegebenen Magnetisierungskurven lassen sich die magnetischen Feldstärken durch mehrgliedrige Summen von verschiedenen Potenzen der magnetischen Induktion mit sehr hoher Genauigkeit darstellen. Ihr charakteristischer Verlauf kann bereits durch wenige Glieder wiedergegeben werden.

Die Berechnung von Feldverlauf und Magnetisierungsbedarf wird auf der Grundlage einer durch eine Potenzsumme dargestellte Magnetisierungskennlinie entwickelt. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen magnetischer Induktion und Erregung führt auf einen Feldverlauf im Luftspalt, der sich von dem des linearen magnetischen Kreises um so mehr unterscheidet, je weiter sich die Eisenmagnetisierung im Sättigungsgebiet befindet. Die Berechnung des Feldverlaufes läßt sich bei vorgegebenem Verlauf des Magnetisierungs-Strombelages mit guter Näherung durchführen, wenn man die für einen bestimmten Umlauf sich ergebenden magnetischen Spannungen und die elektrische Durchflutung ins Gleichgewicht bringt.

Es zeigt sich, daß das nichtlineare Verhalten des magnetischen Kreises durch zwei Parameter beschrieben werden kann, die aus den nichtlinearen Anteilen von Zahn- und Jochspannung, bestimmt für die der Grundschwingungs-

amplitude entsprechenden Induktionen, berechnet werden. Für die durchgeführten Rechnungen zur Ermittlung von Feldverlauf und Magnetisierungsbedarf wurde die Magnetisierungskurve durch ein lineares Glied und ein Glied mit einer neunten Potenz in der Gleichung der magnetischen Induktion nachgebildet. Die Wahl der Konstanten dieser Glieder ist beliebig und kann dem jeweils vorliegenden Fall angepaßt werden.

Hlk

DK 621.311.1.001.24 : 681.14-523.8

Digitale Rechenmaschinen für die Berechnung elektrischer Netze. (Digital computers for supply systems calculations.) Electr. Times Bd. 139 (1961) H. 4, S. 133–134.

Es wird über zwei Aufsätze berichtet, welche die Anwendung von Digitalrechnern mittlerer Größe zum Studium von Netzproblemen behandeln. Im ersten Aufsatz berichten Prof. *Humphrey Davies* und Dr. *Cupta* über Untersuchungen mit einer Pegasus I mit einem Speichervermögen von 7168 Worten, die sich preislich mit einem Netzanalysator gleichstellt. Bei den Rechnungen wurde das Verfahren der Matrixumkehr angewendet. Als Hauptproblem kennzeichnen die Verfasser die Aufstellung eines Kontrollprogramms, das automatisch das Netzwerk verbessert, wenn auf Grund der eingegebenen Daten eine zufriedenstellende Lösung nicht erreicht werden kann. Ein Netzbeispiel, das 28 Sammelschienen umfaßt, benötigt für Programm- und Dateneingabe, für die Rechnung und das Ausschreiben der Ergebnisse insgesamt 14,5 min. Bei Stabilitätsuntersuchungen waren wegen Speichermangels Zwischenrechnungen erforderlich. Eine solche nahm z. B. für ein System mit 33 Sammelschienen mit 14 Maschinen für die Ermittlung eines Koeffizientensatzes 7 min in Anspruch. Die Rechnung ermöglichte auch die Berücksichtigung von Größen, die üblicherweise vernachlässigt werden, wie Schenkeligkeit, Dämpfung des Mitsystems, Wirkung von Reglern usw. Größere und schnellere Rechner ermöglichen nach Meinung der Verfasser eine noch allgemeinere mathematische Formulierung, die stationäre und transiente Vorgänge gleichzeitig umfaßt.

Im zweiten Aufsatz bespricht *John* Untersuchungen an einem Trommelspeicherrechner mit einem Speichervermögen von 4096 Worten. Er benutzte das Gauß-Seidel-Interaktionsverfahren, das im Vergleich zum obengenannten Verfahren die Speicheranforderung mindert und sich physikalisch dem untersuchten System besser anpaßt. Die Rechenzeiten sind gegenüber denen des ersten Verfahrens länger. Die Berechnung eines Systems mit 13 Sammelschienen benötigt 141 min. Eine Kurzschlußstudie braucht 76 min. Es wurde jedoch festgestellt, daß eine Reduktion auf $\frac{1}{15}$ der Zeit mit größeren und schnelleren Rechnern möglich ist. Die Ergebnisse mit den Rechnern und mit Netzanalysatoren sind wegen unterschiedlicher Sensibilität bezüglich der Blindleistungserzeugung nicht gleich. Dies sei jedoch, wenn man den Vergleich verschiedener Systembedingungen anstellt, ohne wesentliche Bedeutung.

Dann folgen Auszüge von 10 Diskussionsbeiträgen, in denen weitere Erfahrungen mit Digitalrechnern mitgeteilt werden. Die Meinungen, ob ein Digitalrechner oder ein Netzanalysator vorzuziehen ist, sind noch geteilt. Die Befürworter eines Netzanalysators sehen jedoch im Digitalrechner ein willkommenes Werkzeug für notwendige Zwischenrechnungen.

Dzl

DK 621.317.332.6 : 621.3.029.5

Über die Messung kleiner Reflexionsfaktoren bei hohen Frequenzen. Nach *Kohler, K.*: Frequenz Bd. 15 (1961) H. 1, S. 12–17; 4 B., 3 Qu.

An Übertragungsleitungen werden in bezug auf geringe Reflexion hohe Anforderungen gestellt. Der Verfasser beschreibt ein Verfahren, mit dem bei hohen Frequenzen kleine Reflexionsfaktoren mit einer Meßungenauigkeit von 0,1 % nach Betrag und Phase gemessen werden können. Auch die theoretischen Grundlagen dieses bei Koaxialsystemen und Hohlleitern anwendbaren Verfahrens werden angegeben. Verwendet wird ein handelsüblicher Richtkoppler mit einem zusätzlichen Abstimmvierpol. Durch das Meßverfahren werden die Eigenfehler des Richtkopplers und auch die Fehler des Abstimmvierpols eliminiert. Wenn der Richtkoppler ein anderes Profil als das Meßobjekt hat, braucht man nur ein zusätzliches Übergangsglied einzuschalten; der Fehler dieses Zwischenvierpols kann ebenfalls eliminiert werden.

Nach der Beschreibung der Meßschaltung (Meßkoppler) wird gezeigt, daß man nach Einführen des Eigenreflexionsfaktors des Meßkopplers den Betrag des bezogenen Reflexionsfaktors messen kann. Ein Vergleich der am Meßanschluß des Meßkopplers liegenden Spannung mit der bei Abschluß des Meßkopplers nur durch einen Blindwiderstand auftretenden Spannung liefert den Betrag des bezogenen Reflexionsfaktors. Der Meßkoppler ist aus linearen, passiven und reziproken Elementen aufgebaut und stellt einen Sechspol dar. Um Fehlmessungen zu vermeiden, muß zwischen Meßkoppler und Sender ein Dämpfungsglied eingeschaltet werden.

Mit Hilfe von Stiften im Abstimmvierpol kann die Phase des bezogenen Reflexionsfaktors bestimmt werden, die auf die Meßebebene bezogen sein soll. Durch Einschieben eines Stiftes wird dem Meßobjekt eine veränderliche Kapazität parallelgeschaltet. Als innere Größe des Meßkopplers ist der Eigenreflexionsfaktor unabhängig vom Meßobjekt; er braucht nur einmal bestimmt zu werden. Als Normalwiderstand wird der Wellenwiderstand einer Normalleitung verwendet, in der ein Absorber angebracht ist. Der durch einen unvollkommenen Absorber hervorgerufene Fehler läßt sich beseitigen, wenn dieser in der Normalleitung verschiebbar angeordnet wird. Der Eigenreflexionsfaktor des Meßkopplers läßt sich bestimmen, indem man für zwei verschiedene Stellungen des Absorbers den bezogenen Reflexionsfaktor mißt, die Mitte auf der Verbindungsgeraden der beiden Meßpunkte bestimmt und dann das Vorzeichen des gefundenen Wertes umdreht.

Der Verfasser nennt dann eine Meßvorschrift für die Messung kleiner Reflexionsfaktoren, die sich im 4-GHz-Bereich gut bewährt hat. Abschließend werden die Fehler abgeschätzt, die durch Ablesefehler und das Meßverfahren hervorgerufen werden. Zum Messen werden ein Anzeigegerät und eine Eichleitung benötigt, mit denen sich große Pegelunterschiede mit Sicherheit bestimmen lassen. Durch gute Schirmung muß dafür gesorgt werden, daß die Anzeige nicht durch Störstrahlung beeinflusst wird. Mit dem beschriebenen Meßverfahren können sehr hohe Meßgenauigkeiten erreicht werden. Wenn beispielsweise für den Eigenreflexionsfaktor der Wert 0,5 % und den bezogenen Reflexionsfaktor 1 % angenommen werden, dann beträgt der größte Meßfehler nur 0,06 % vom Sollwert.

Hlk

DK 621.373.4

Selbsterregte Oszillatoren für großen Frequenzbereich. (A wide band voltage controlled oscillator.) Nach *Weston, M. A.*: Electronic Engng. Bd. 33 (1961) H. 395, S. 2–5; 5 B.

Die Arbeit beschreibt ein Verfahren, mittels dessen die Frequenz eines selbsterregten Oszillators durch Änderung einer Spannung variiert werden kann. Das Prinzip der Anordnung beruht darauf, daß ein Zweig des frequenzbestimmenden, aus Induktivität L und Kapazität C bestehenden, Schwingungskreises des Oszillators aus der Reihenschaltung zweier Kondensatoren gebildet wird. Parallel zu einem dieser beiden Kondensatoren ist eine Kombination von Siliziumdioden geschaltet, deren Vorspannung verändert werden kann. Hierdurch ändert sich die Kapazität der Kondensatoren und somit auch die Frequenz des LC-Oszillators, die also von der Diodenvorspannung abhängt.

Ein Anwendungszweck für eine derartige Schaltung, bei der die Frequenz eines Generators durch diese elektrotechnischen Maßnahmen ohne Zuhilfenahme mechanischer Mittel wie Drehkondensatoren oder dergleichen verändert werden kann, ist beispielsweise die Fernübertragung von Meßwerten aus Radiosonden. Dafür ist aber Voraussetzung, daß diese Frequenzänderung in einem linearen Zusammenhang mit der steuernden Spannung steht. Es werden daher auch die Ursachen betrachtet, die eine Nichtlinearität im Zusammenhang zwischen der steuernden Spannung und der Frequenz des Oszillators zur Folge haben können und im wesentlichen auf die Frage einer richtigen Bemessung hinauslaufen.

In einem beschriebenen Ausführungsbeispiel werden 10 Gruppen von Kondensatoren mit Paralleldioden benutzt, und man erhält so eine Variationsmöglichkeit der Frequenz über den weiten Bereich von 1,5 bis 3,0 MHz, die praktisch linear mit der steuernden Spannung verläuft. Der Aufwand der ganzen Anordnung ist zwar erheblich, aber es ergibt sich, wie die experimentelle Untersuchung ergab, eine Nichtlinearität von nur etwa 0,5 % des Sollwertes.

Bwg

VERBANDSNACHRICHTEN

VDE

Verband Deutscher Elektrotechniker

Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21

Fernruf: 60 341; Fernschreiber (Telex): 04-12 871;

Telegramm-Kurzanschrift: Elektrobund;

Postscheckkonto: Frankfurt a. M. 388 68.

Bekanntmachung für den Entwurf 2 der Neufassung von VDE 0303 „Leitsätze für elektrische Prüfungen von Isolierstoffen“ Teil 1 „Bestimmung der Kriechstromfestigkeit bei Betriebsspannungen unter 1000 Volt“

Auf Grund der zum 1. Entwurf eingegangenen Einsprüche sowie zur weiteren Angleichung an die IEC-Empfehlungen hat der DNA/VDE-Gemeinschaftsausschuß 4.64 „Lichtbogen- und Kriechstromfestigkeit“ unter Vorsitz von Dr.-Ing. H. Suhr einen 2. Entwurf zu VDE 0303 Teil 1 ausgearbeitet. Es ist beabsichtigt, diesen Entwurf erst Ende 1963 oder Anfang 1964 in Kraft zu setzen und die zur Zeit gültige Fassung zum gleichen Zeitpunkt außer Kraft zu setzen. In der Zwischenzeit soll die Brauchbarkeit der angegebenen Prüfmethoden erprobt werden.

Einen Einführungsaufsatz zu dem Entwurf enthält dieses Heft auf Seite 859.

Der Entwurf 2 kann unter der Bezeichnung VDE 0303 Teil 1/...62 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 1,30 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen den Entwurf 2 sowie gegen den vorgesehenen In- und Außerkraftsetzungstermin können bis zum 30. September 1963 bei der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende

VDE-Vorschriftenstelle

Potthoff

Weise

Nachtrag zum 2. Entwurf der Änderung a des Teils 1 von VDE 0720 „Vorschriften für Elektrowärmeegeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke“

Um noch deutlicher herauszustellen, daß die Bestimmungen von VDE 0720 für alle Elektrowärmeegeräte gelten, die von Laien bedient werden, hat die Kommission unter Vorsitz von Dr.-Ing. L. Nawo beschlossen, den Geltungsbereich allgemeiner zu fassen. Sie stellt deshalb in diesem Nachtrag folgende Änderungen des Teils 1 § 1 zum Einspruch.

§ 1

Gültigkeit

b) Geltungsbereich.

1. Hinter „Solche sind“ wird eingefügt „unter anderem“.

Absatz 2 wird wie folgt neu gefaßt:

2. Diese Vorschriften gelten nicht für

2.1 Elektrowärmeeinrichtungen für industrielle Zwecke.

Hierfür gilt VDE 0721 „Leitsätze für industrielle Elektrowärme-Einrichtungen“ (zur Zeit Entwurf).

2.2 Schmiegsame Elektrowärmeegeräte.

Hierfür gilt VDE 0725 „Vorschriften für schmiegsame Elektrowärmeegeräte“.

(2.3 und 2.4 werden gestrichen.)

Einsprüche gegen diesen Nachtrag können bis zum 31. Januar 1962 der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende

VDE-Vorschriftenstelle

Nawo

Weise

Entwurf der Änderung a von VDE 0871 „Funkstör-Grenzwerte für Hochfrequenzgeräte und -anlagen“

Die VDE-Kommission „Funk-Entstörung von Hochfrequenzgeräten und -anlagen“ hat einigen Anträgen auf Berücksichtigung von inzwischen gewonnenen Erkenntnissen in VDE 0871 zugestimmt.

Der Entwurf der Änderung kann unter der Bezeichnung VDE 0871 a/... 61 vom VDE-Verlag, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, zum Preise von 0,40 DM bezogen werden.

Einsprüche gegen den Entwurf können bis zum 1. März 1962 der VDE-Vorschriftenstelle, Frankfurt a. M., Stresemannallee 21, eingereicht werden (doppelte Ausfertigung erbeten).

Der Kommissionsvorsitzende

VDE-Vorschriftenstelle

Dennhardt

Weise

Ermächtigung zum vorläufigen Erteilen des VDE-Funkschutzzeichens für Hochfrequenzgeräte und -anlagen nach VDE 0871 „Funkstör-Grenzwerte für Hochfrequenzgeräte und -anlagen“ mit Berücksichtigung des Entwurfes VDE 0871 a/... 61

Die VDE-Kommission „Funk-Entstörung von Hochfrequenzgeräten und -anlagen“ hat beschlossen, gemäß dem in ETZ-A Bd. 80 (1959) S. 314 bekanntgegebenen „Verfahren zur Erteilung vorläufiger VDE-Zeichengenehmigungen“ die VDE-Prüfstelle zu ermächtigen, vorläufige Genehmigungen zum Führen des VDE-Funkschutzzeichens für Hochfrequenzgeräte und -anlagen zu erteilen, die VDE 0871/11. 60 mit den in dem vorstehend angekündigten Entwurf VDE 0871 a/... 61 angegebenen Änderungen entsprechen.

Der Kommissionsvorsitzende

VDE-Vorschriftenstelle

Dennhardt

Weise

Einspruchsfristen zu Entwürfen von VDE-Bestimmungen

VDE 0555/... 61 „Quecksilberdampfstromrichter“,

angekündigt in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 23, S. 756,

Einspruchsfrist bis 1. Januar 1962.

VDE-Verlag GmbH

Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33

Neu erschienen sind

CEE-Publikationen in deutscher Übersetzung

CEE 19: Anforderungen an kleine Selbstschalter für Hausinstallationen und ähnliche Zwecke

Format DIN A 5, 61 S., mit 7 B. und 5 Normblätter. Preis kart. DM 8,—

CEE 20: Anforderungen an Elektrowerkzeuge

Format DIN A 5, 76 S., mit 11 B. Preis kart. DM 8,—

Englische Übersetzungen

VDE 0134/12. 55 (Engl.)

First Aid Guide for Accidents DM 2,—

VDE 0265/11. 58 (Engl.)

Specifications for Rubber- or Plastic-Insulated Lead-Sheathed Cables for Electricity Supply DM 3,20

Folgende Gesamtfassungen von VDE-Bestimmungen liegen vor:

VDE 0150/12. 60 Leitsätze zum Schutz von Rohrleitungen

und Kabeln gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen (enthält als Abschnitt VI VDE 0115 d/11. 57) DM 2,60

VDE 0560 Teil 3/1. 58 Regeln für Kondensatoren

Teil 3 Regeln für Kondensatoren für Kopplung, Spannungsmessung und Überspannungsschutz .. DM 0,90

Nachrichtentechnische Gesellschaft im VDE

Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21

Preis der NTG 1961

Der Vorstand der NTG hat in seiner Sitzung am 11. Oktober 1961 je einen Preis der NTG 1961 an acht Autoren verliehen.

Nach den Bestimmungen wird der mit einer Prämie von DM 500,— verbundene Preis der NTG alljährlich an jüngere NTG-Mitglieder für Veröffentlichungen verliehen, die von den Fachausschüssen der NTG und einem eigens eingesetzten Prüfungsausschuß als prämiierungswürdig bewertet wurden und aus den besten Veröffentlichungen des jeweiligen Vorjahres ausgewählt werden. Prämiert werden Arbeiten, die eine schöpferische Leistung bekunden, d. h. nach Inhalt oder Art der Darstellung originell, dabei klar und womöglich anschaulich sind. Auch zusammenfassende Darstellungen eines größeren Gebietes können in Betracht kommen, ohne daß die Arbeiten notwendigerweise neue wissenschaftliche Erkenntnisse vermitteln müssen.

Je ein „Preis der NTG 1961“ wurde an die folgenden Autoren verliehen:

1. Dr.-Ing. Thomas-Alfred Abele, Aachen, für die Arbeit

„Über die Streumatrix allgemein zusammengeschalteter Mehrpole“

[Arch. elektr. Übertr. Bd. 14 (1960), S. 262—268].

2. Dr.-Ing. Karl Baur, Ulm, für die Arbeit

„Zur Theorie des allgemeinen Adcocks“

[Arch. elektr. Übertr. Bd. 14 (1960), S. 1—14 und 57—70].

3. Dr. rer. nat. Otto Gold, München, für die Arbeit

„Reaktanz-Schaltungen aus elektromagnetisch gekoppelten Leitungen in der Dezimeterwellentechnik“

[Nachrichtentechn. Z. Bd. 13 (1960), S. 15—23].

4. Dr.-Ing. *Karl-Heinz Kupferschmidt*, Aachen, für die Arbeit
„Messung elektronischer Leitwerte bei cm-Wellen“
(Diss. TH Aachen 1960).
5. Dr.-Ing. *Hans Leysieffer*, München, für die Arbeit
„Nichtlineare Verzerrungen durch Laufzeiteinflüsse in Eingitter-
röhren“
[Arch. elektr. Übertr. Bd. 14 (1960), S. 269—282].
6. Dr.-Ing. *Peer Thilo*, München, für die Arbeit
„Ein Ortskurvenschreiber für Frequenzen zwischen 10 kHz und
200 MHz“
[Frequenz Bd. 14 (1960), S. 403—412].
7. Dr.-Ing. *Egbert Ulbrich*, Backnang, für die Arbeit
„Über den Entwurf von Allpässen, Tiefpässen und Bandpässen
mit einer im Tschebyscheffschen Sinne approximierten konstan-
ten Gruppenlaufzeit“
[Arch. elektr. Übertr. Bd. 14 (1960), S. 451—467].
8. Dr.-Ing. *Klaus Welland*, Hannover, für die Arbeit
„Die elektronische Umkehrung von photographischen Farbnega-
tiven“
[Arch. elektr. Übertr. Bd. 14 (1960), S. 441—450].

Der Vorstand der NTG beglückwünscht alle Preisträger zu der ihnen zuteil gewordenen Anerkennung.

W. Kleen

Vorsitzender der NTG

ERLÄUTERUNGEN ZU VDE-BESTIMMUNGEN

Bestimmung der Kriechstromfestigkeit bei Betriebsspannungen unter 1000 V

Von *Horst Suhr*, Berlin*)

Die im Jahre 1955 erschienenen Leitsätze VDE 0303 Teil 1/10. 55 trugen im Vorwort den Vermerk, daß eine Überarbeitung im Hinblick sowohl auf neue Erfahrungen und Erkenntnisse als auch auf das Erscheinen einer entsprechenden Empfehlung der IEC vorgesehen war. Die IEC-Veröffentlichung Nr. 112, erschienen 1959, empfiehlt ein Tropfverfahren, das jedoch mit anderen Prüf- und Gerätebedingungen als das gültige deutsche arbeitet. Nach umfangreichen Untersuchungen und Gemeinschaftsversuchen legt der DNA/VDE-Gemeinschaftsausschuß nun einen Entwurf vor, der weitgehend der IEC-Empfehlung angeglichen wurde. Er enthält nur dann abweichende Bestimmungen, wenn dadurch bessere reproduzierbare Ergebnisse zu erwarten sind. Dazu sei noch bemerkt, daß auch in der IEC über einzelne Abänderungen diskutiert wird.

Nach dem vorliegenden Entwurf 2 von VDE 0303 Teil 1 werden zwei Tropfverfahren, A und B, eingeführt, die zwar dieselben Geräte benutzen, jedoch unterschiedliche Prüfvorgänge haben. Während für das Verfahren A bei der festen Spannung von 380 V die Tropfenzahl bis zum Kurzschluß oder bei 101 Auftropfungen zusätzlich die Aushöhltiefe bestimmt wird, wird nach dem Verfahren B die höchste Spannung festgestellt, bei der bis zum 50. Tropfen kein Kurzschluß eintritt.

Zu den Änderungen der Prüfgeräte sei auf folgende Einzelheiten gesondert hingewiesen. Die Elektroden, 5 mm breit und 2 mm dick, sollen aus Platin bestehen. Dieser Werkstoff wurde gewählt, da auch nach einer großen Zahl von Prüfungen an diesen Elektroden kein merklicher Abbrand eintrat. Dagegen haben Elektroden aus Kupfer, Messing, Nickel oder Wolfram infolge der Werkstoffwanderung recht streuende Ergebnisse. Die Tropfengröße wurde in Anlehnung an die Empfehlungen der IEC auf $23 \text{ mm}^3 \pm 3 \text{ mm}^3$ festgelegt. Die Prüflösung A, NH_4Cl mit Zusatz eines Spannungsmittels, steht in Gegensatz zu den IEC-Empfehlungen, sie wurde jedoch beibehalten. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß gerade durch diesen Zusatz eine günstige Übereinstimmung mit der Praxis und gleichmäßigere Ergebnisse zu erreichen sind. Die Prüflösung F, die nach der IEC-Empfehlung kein Entspannungsmittel enthält, wurde auch aufgenommen, sie ist jedoch Sondervereinbarungen vorbehalten. Ein Auslösestrom von 0,5 A wurde gewählt, um das Abschalten durch die Leitfähigkeit des Tropfens oder durch kleinere Überschlüsse zu verhindern. Der in der IEC-Empfehlung angegebene Auslösestrom von 0,1 A liegt zu niedrig und hat zu Fehlbeurteilungen Anlaß gegeben.

*) Dr.-Ing. *H. Suhr* ist Vorsitzender der VDE-Kommission 0303.

Für die Auswertung des Verfahrens A wird für Kunststoffe eine Stufentafel angegeben, die für Proben zwei Stufen (1 bis 10 und 11 bis 100 Tropfen) vorsieht, sobald ein Kurzschluß unter 101 Tropfen entsteht. Die dritte Stufe ist den Stoffen vorbehalten, bei denen unter 101 Tropfen kein Kurzschluß auftritt, aber ihrer Aushöhlung nach grob unterteilt werden sollen. Bei anderen Stoffen, z. B. Gesteine, Keramik, Gummi usw., wird die Anzahl der Tropfen angegeben und zwar bei 101 Tropfen unter Zusatz der Aushöhlungstiefe. Nach dem Verfahren B wird in Stufen von jeweils 20 V (feinere Unterteilungen sind im Hinblick auf die unvermeidbaren Streuungen und die aus den Ergebnissen abzuleitenden technisch-konstruktiven Maßnahmen zwecklos) durch Probieren diejenige Spannung ermittelt, bei der bis zu 50 Tropfen kein Kurzschluß eintritt. Um zu vermeiden, daß der Zahlenwert der Spannung konstruktiv angewendet wird und zu anwendungstechnischen Fehlern führt, wird nur „Stufe B 120“, also ohne Zusatz der Einheit „Volt“, im Prüfbericht angegeben. Eine in der Norm angeführte Stufentafel von Spannungen gestattet es, das Einhalten von Mindestanforderungen ähnlich dem Verfahren A zu prüfen.

Der Entwurf 2 von VDE 0303 Teil 1 soll etwa zwei Jahre gelten, damit man ihn eingehend überprüfen kann. Er soll dann nach nochmaliger Beratung die z. Z. gültigen Leitsätze VDE 0303 Teil 1/10. 55 ersetzen.

PERSÖNLICHES

M. Schwaiger †. — Am 7. Oktober 1961 verschied in Nürnberg nach langem schwerem Leiden, wenige Tage nach dem Übertritt in den Ruhestand, Obergeringenieur *Max Schwaiger*, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Siemens-Schuckertwerke.

Geboren am 21. April 1896 in Kempten, widmete sich *M. Schwaiger* nach dem Besuch des dortigen Humanistischen Gymnasiums dem Studium der Elektrotechnik an der HTL Nürnberg, das er mit dem Prädikat „sehr gut“ abschloß. Seine berufliche Laufbahn begann im Jahre 1921 im Transformatorenwerk der Siemens-Schuckertwerke, dem er über 40 Jahre bis zu seinem Tode verbunden blieb. Nach mehrjähriger Tätigkeit als Konstrukteur und Berechnungsingenieur für Großtransformatoren wurde *Schwaiger* auf Grund seiner ausgeprägten Befähigung zu wissenschaftlicher Arbeit bereits in jungen Jahren mit schwierigen Sonderaufgaben, in erster Linie mit der damals im Anfangsstadium befindlichen Entwicklung von Regeltransformatoren betraut. 1938 übernahm er unter gleichzeitiger Beförderung zum Obergeringenieur die Leitung der Stufenschalterentwicklung, 1953 wurde er in Würdigung der großen Erfolge seiner Entwicklungsarbeit zum Wissenschaftlichen Mitarbeiter der Siemens-Schuckertwerke ernannt.

M. Schwaiger ist in weiten Kreisen der in- und ausländischen Fachwelt durch seine erfolgreiche schöpferische Tätigkeit auf dem Gebiet der Stufenschalter für Transformatoren, die den Inhalt seiner Lebensarbeit bildete, als Fachmann anerkannt. Über 100 erteilte Patente, zahlreiche Veröffentlichungen und Vorträge zeugen von seinem Gedankenreichtum und Erfindergeist. Die technische Reife der von *Schwaiger* entwickelten Stufenschalter entsprang seinem systematischen Denken und der von hohem Verantwortungsbewußtsein getragenen Zielstrebigkeit, mit der er eine Idee, unbeirrbar durch Rückschläge, bis zum Gelingen verfolgte. Als Krönung seines Lebenswerkes war es *Schwaiger* kurz vor seinem Tode noch vergönnt, die Anerkennung maßgebender Stellen für die Bewährung von Stufenschaltern für Triebfahrzeug-Transformatoren mit Hochspannungssteuerung zu finden, deren Entwicklung von ihm richtunggebend beeinflusst wurde.

Mit dem Tode von *Schwaiger* verliert die Elektrotechnik einen ungewöhnlich begabten Ingenieur mit hohem Können, der VDE ein langjähriges treues Mitglied, das seine großen Kenntnisse und Erfahrungen der Arbeit in der VDE-Kommission für Transformatoren zur Verfügung stellte. Zahlreiche Freunde und Mitarbeiter beklagen den Verlust eines hochgeachteten wertvollen Menschen, den große Bescheidenheit und Liebenswürdigkeit auszeichneten.

L. Maurer

C. Lehner. — Am 21. November 1961 feierte Senator *Carl Lehner*, Mitbegründer der Firma Telefonbau und Normalzeit in Frankfurt a. M., seinen 90. Geburtstag. Das von *H. Fuld* und ihm gegründete Unternehmen besteht seit 62 Jahren und beschäftigt heute im In- und Ausland mehr als 14 000 Menschen.

In *C. Lehner* vereinigen sich in besonderem Maße die Kenntnisse von Feinmechanik und Elektrotechnik. Er hatte in Heilbronn das Uhrmacherhandwerk gelernt, sich jedoch bald der Elektrotechnik zugewendet. Hier entwickelte er vorwiegend Meßinstrumente.

Die ersten Telefonentwicklungen des jungen Konstrukteurs waren Hausapparate, dann folgten Amt-Haus-Reihenapparate mit einem Wechselschalter.

Von den weiteren Entwicklungen auf dem Fernsprechegebiet, die er maßgebend beeinflusste, seien genannt: Umschaltsschränke für Außenstellen, die ersten automatischen Nebenstellen-Fernsprechanlagen mit Wählern für zuerst 25 und schließlich mehr als 1000 Anschlüsse (Berliner Polizei-Fernsprechnet) sowie vielfältige Arbeiten auf dem Gebiet der Fernwähltechnik.

Im Jahre 1925 wurde er von der Technischen Hochschule Karlsruhe in Anerkennung seiner Verdienste um das technische Nachrichtenwesen zum Ehrensensator ernannt. Von 1926 bis 1932 war C. Lehner Vorsitzender des Vorstandes der H. Fuld AG. Als Vorsitzender der Telefonbau und Normalzeit Lehner & Co. und dann stellvertretender Vorsitzender des Beirates der Firma blieb er bis zu seinem 80. Lebensjahr aktiv tätig. *fi.*

G. Markt. — Professor D. Dr. *Gustav Markt* vollendete am 13. Dezember sein 80. Lebensjahr. Mit einer 1932 gemeinsam mit Dr. B. Mengele veröffentlichten Arbeit regte er das Bündeln der Phasenleiter der Hochspannungsfreileitungen zwecks Erhöhung der natürlichen Leistung, Senkung der Koronaverluste und der Rundfunkstörungen an, das sich allmählich in der ganzen Welt durchsetzte. Im Jahre 1956 ernannte ihn die TH Wien zu ihrem Ehrenbürger, im Jahre 1960 verlieh ihm die TH München die Würde eines Doktors ehrenhalber. Er hat die Ausführung von Freileitungsarmaturen so verbessert, daß die Sicherheit von Freileitungen mit gebündelten Phasenleitern erhöht wurde. Er war Vorstandsmitglied der Österreichischen Siemens Schuckert-Werke und Professor an der TH Wien. G. Markt ist als geschäftsführender Direktor der Westtiroler Wasserkraftwerke AG in Innsbruck tätig. *of.*

JUBILÄEN

J. Burg. — Am 1. November 1961 feierte der Betriebsleiter der Firma Jean Müller OHG, Eltville, Ing. J. Burg, sein 50jähriges Arbeitsjubiläum.

In den Jahrzehnten seiner Tätigkeit ist der Jubilar durch seine reiche Erfindungsgabe in der Fachwelt des In- und Auslandes bekannt geworden. Auch heute noch gilt der Weiterentwicklung des Sicherungsbaues sein Hauptinteresse. Der Aufbau der Porzellanfabrik ist im wesentlichen sein Werk.

Auf Grund seiner körperlichen und geistigen Frische wird J. Burg auch weiterhin seiner Firma zur Verfügung stehen. *fi.*

W. Niens. — Professor Dr. *Walter Niens* steht seit Mitte November 1936 in den Diensten der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Er ist bekannt geworden durch seine zielbewußte Arbeit in der Berufsausbildung des technischen Nachwuchses der AEG einerseits und seine leitende Tätigkeit im AEG-Forschungsinstitut, Berlin-Reinickendorf, andererseits. Nach 1945 wurde der geborene Dortmunder mit dem Wiederaufbau des Berliner Forschungsinstitutes und des Ausbildungswesens der AEG beauftragt. Seine Persönlichkeit wirkt sich ebenso an der TU, Berlin-Charlottenburg, die ihm 1956 einen Lehrauftrag für Arbeitswissenschaft erteilte, wie bei der Ausbildung des technischen Nachwuchses, deren Leitung seit 1957 in seiner Hand liegt.

In vielen Ausschüssen und Organisationen — vor allem der elektrotechnischen Industrie — ist Dr. W. Niens ein tätiger und angesehener Mitarbeiter, u. a. ist er Vorsitzender des Kuratoriums der Staatlichen Ingenieurschule Beuth und des Berufsausbildungsausschusses der Industrie- und Handelskammer zu Berlin. *fi.*

150 Jahre Fried. Krupp. — Als am 20. November 1811 die Firma Fried. Krupp „zur Verfertigung des englischen Gußstahles und aller daraus resultierenden Fabrikate“ gegründet wurde, kam es dem Firmengründer wohl in erster Linie darauf an, den Guß- oder Tiegelstahl, der von den Engländern erfunden worden war und dessen Fabrikation als Geheimnis gehütet wurde, herzustellen. Sein Entschluß, Gußstahl zu erzeugen, wurde gefördert durch die Blockade, die Kontinentalsperre, die Napoleon I. 1806 über England verhängte und durch die der auf dem Kontinent unentbehrlich gewordene Tiegelstahl nicht mehr eingeführt werden konnte.

1816 gelang es *Friedrich Krupp* nach kostspieligen Versuchen, den ersten Tiegelstahl in bescheidenen Mengen herzustellen und ihn an verschiedene Fabriken der Umgebung zum Herstellen von Werkzeugen zu liefern. Gleichzeitig fertigte er aus seinem Stahl Gerberwerkzeuge, Bohrer, Drehstähle und vor allen Dingen Prägestempel für die Münzämter an, die einen harten und zähen Stahl verlangten. Auch lieferte er kleine Walzen für die Herstellung von Silber- und Golddrähten für die Schmuckwaren- und ver-

wandte Industrien. Mit der Produktion von Walzen erschloß er ein Gebiet, das sein Nachfolger Alfred Krupp zur Grundlage seines Geschäftes machte und das bis heute seine Bedeutung behalten hat.

Friedrich Krupp hat in den 15 Jahren, die ihm nach der Gründung seiner Firma noch zu leben vergönnt waren, viel gewagt und viel verloren. 1824 zwang ihn die wirtschaftliche Lage, in das später als „Stammhaus“ bekannt gewordene kleine Aufseherhaus zu ziehen.

Als *Friedrich Krupp* 1826 starb, hinterließ er eine Fabrik mit vier Arbeitern, Erfahrungen in der Gewinnung und Verwendung von Tiegelstahl und 10 000 Reichsthaler Schulden, die aus Darlehen seiner Familie stammten, die der Witwe *Therese Krupp* und dem 14jährigen Geschäftsführer *Alfred Krupp* auch weiterhin mit Betriebskrediten aushalf.

Unter *Alfred Krupp* (Bild 1) beginnt ein stetiger, wenn auch von Zeit zu Zeit durch Rückschläge unterbrochener Aufstieg, der sich bis zu seinem Tode im Jahre 1887 fortsetzte. *Alfred Krupp* war ein wagemutiger, genialer Unternehmer, der trotz der fehlenden technischen Fachschulausbildung ein großes technisches Verständnis und Einfühlungsvermögen hatte. Eine seiner ersten Erfindungen war die zweiteilige Walze, ein auf einem Dorn ringförmig geschmiedeter Stahlmantel, der nach dem Härten auf eine Achse aufgeschrumpft wurde. So entstand bereits im Jahre 1831 auf der Vorläufer der heutigen schweren geschmiedeten Mantelstützwalze.

Der Kauf einer Dampfmaschine im Jahre 1836 zum Antrieb der Hämmer schaffte die Voraussetzung für die Entwicklung von Großschmiedestücken für die damals aufkommende Dampfschiffahrt und Eisenbahn. Das 1841 gelieferte Walzwerk ist der Beginn für die Tätigkeit auf dem Gebiete des Maschinenbaues. Der Aufstieg des Werkes ist auch daraus zu ersehen, daß Krupp bereits 1851 auf der Londoner Weltausstellung einen Stahlblock von 2,15 t Gewicht zeigen konnte, der selbst für England, das klassische Land des Stahles, eine Sensation war.

Einige charakteristische und wichtige Erfindungen und Entwicklungen aus der Tätigkeit von *Alfred Krupp* sind die Herstellung von Eisenbahnfedern und -Achsen sowie des nahtlosen Radreifens, der Bau des Dampfhammers „Fritz“ und die erste Anwendung des Bessemer- und Siemens-Martin-Verfahrens auf dem Kontinent bzw. in Deutschland bei der Stahlerzeugung.

Im Jahre 1862 baute Krupp das erste Bessemer-Stahlwerk auf dem Kontinent. Der Bessemer-Stahl eignete sich gut für die Massenproduktion von Schienen, Rädern usw. Durch ihn konnte die Stahlproduktion und -verwendung wesentlich gesteigert werden. Inzwischen wurde durch die Erfindung des Siemens-Martin-Ofens ein neues Stahlherstellungsverfahren entwickelt und von *Alfred Krupp* 1869 in Deutschland eingeführt. Die ersten Ofen hatten ein Fassungsvermögen von 4 t, wogegen heute auf den Kruppschen Hüttenwerken Siemens-Martin-Ofen mit einem Fassungsvermögen von 240 t und mehr betrieben werden.

Schon in frühen Jahren leistete *Alfred Krupp* auf einen großen Teil der Erzeugnisse Garantien, woraus sich eine besondere Betonung und Pflege der Wertarbeit entwickelte, welche die Kruppschen Erzeugnisse in der Welt bekannt machte.

Bei seinem Tod im Jahre 1887 hinterließ *Alfred Krupp* ein Werk, das in dieser Art in der Welt einzigartig war. Es hatte damals eine Belegschaft von über 20 000 Mann und einen Stamm von guten Mitarbeitern. Sein Jahresumsatz betrug 42,2 Mio. Mark. Seine Erzeugnisse, welche das Gebiet von der Erzgewinnung über Roheisen und Stahl bis zu Fertigerzeugnissen wie Schmiedestücke, Walzwerkserzeugnisse, Eisenbahnmaterial aller Art und Geschütze umfaßten, hatten in der Welt einen guten Klang.

Unter seinem Sohn *Friedrich Alfred Krupp* wurde der Ausbau des Werkes systematisch weitergeführt. Eine wesentliche Erweiterung war 1893 das Grusonwerk in Magdeburg mit seinem großen Fertigungsprogramm, das sich auf Erfahrungen und Kenntnissen auf dem Gebiete des Hartgusses aufbaute. Von besonderer Bedeutung war auch im Jahre 1896 die Übernahme der Germania-Werft in Kiel, die für den Bau von Fracht- und Fahrgastschiffen bis zu den größten Abmessungen und für Dock- und Reparaturbetrieb eingerichtet war. An den Schiffbaubetrieb gliederten

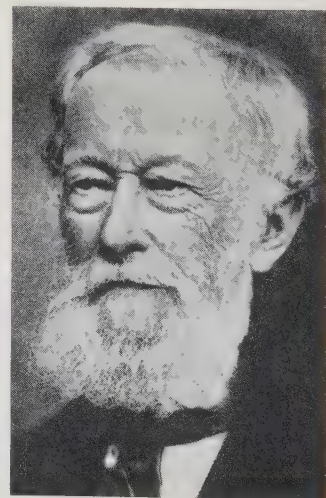


Bild 1. Alfred Krupp (1812–1887).

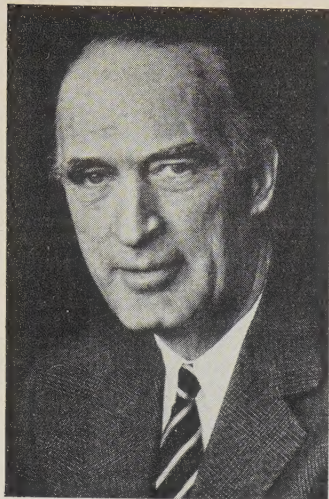


Bild 2. Der jetzige Allein inhaber der Firma Fried. Krupp, Essen, Alfred Krupp von Bohlen und Halbach.

sich Maschinenbauwerkstätten für den Bau größter Dieselmotoren, Dampfturbinen und eine Kesselschmiede an.

In Friedrich Alfreds Zeit fällt auch die Verbindung der Firma mit Rudolf Diesel, dessen Motor im Jahre 1897 gemeinsam von den Firmen Krupp und Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG gebaut wurde.

Da die älteren Hochofenanlagen den steigenden Anforderungen nicht mehr genügten, wurde der Bau eines großen gemischten Hüttenwerkes, der Friedrich-Alfred-Hütte in Rheinhausen 1896 begonnen und 1905 vollendet. Hier wurde neben Siemens-Martin-Stahl zum ersten Mal auch Thomasstahl bei der Firma Fried. Krupp erzeugt, wodurch die Rohstahlproduktion stark anstieg. So betrug im Jahre 1960 die Rohstahlproduktion des Hüttenwerkes Rheinhausen (früher Friedrich-Alfred-Hütte) rd. 2,3 Mio. t und die des Bochumer Vereins 1,56 Mio. t, zusammen also rd. 3,9 Mio. t.

Anfang der 90er Jahre wurde von Krupp in Deutschland die erste hydraulische 5000-t-Schmiedepresse aufgestellt, die außerordentlich zur Entwicklung der Großschmiedestücke und zum Bau von Schmiedepressen beigetragen hat.

Im Jahre 1902 wurde das Wirken Friedrich Alfred Krupps durch seinen Tod beendet und das Werk, das 1903 in eine Aktiengesellschaft umgewandelt wurde, von seiner Gattin und seiner ältesten Tochter Bertha, die sich im Jahre 1906 mit Gustav von Bohlen und Halbach vermählte, weitergeführt.

1909 wurde Gustav Krupp von Bohlen und Halbach als Vorsitzter des Aufsichtsrates der oberste Leiter des Werkes. Ein ständiger Aufschwung trat um diese Zeit in der Wirtschaft ein und hielt bis zum Beginn des ersten Weltkrieges an.

Mit dem Fortschritt auf dem Gebiete des Elektromaschinenbaues war der Weg für die moderne Stahlerzeugung im Elektro-Ofen frei, die von der Firma Fried. Krupp bereits im Jahre 1907 durch den Bau eines Elektrostahlwerkes aufgenommen wurde. Im Laufe einiger Jahre wurden die Elektrostähle so weit entwickelt, daß sie die hochwertigen Tiegelstähle ersetzen.

Schon die letzten Jahre vor dem ersten Weltkrieg waren von sehr starker Forschungstätigkeit gekennzeichnet, die sich entsprechend dem Charakter der Firma Fried. Krupp hauptsächlich auf das metallurgische Gebiet erstreckte. Ein bedeutendes Ergebnis der Krupp-Forschung war die Erfindung des nichtrostenden und säurebeständigen Chrom-Nickel-Stahles, der im Jahre 1912 erstmals angeboten wurde und in Deutschland und in fast allen anderen Ländern Patentschutz erhielt.

Das Ende des ersten Weltkrieges 1918 traf die Firma Krupp besonders hart, da die Kriegsmaterialproduktion plötzlich eingestellt werden mußte und in der Gußstahlfabrik 44,5 % der Maschinen mit einem Gewicht von 46 000 t und zahlreiche Anlagen und Gebäude, die der Herstellung und Montage von Kriegsmaterial gedient hatten, zerstört wurden.

Durch die vorhandenen mechanischen Werkstätten und den ausgezeichneten Facharbeiterstamm bot sich die Ausweitung des Maschinenbaus zwangsläufig an. So wurde mit dem Bau von Lokomotiven, Baggern, Eisenbahnfahrzeugen, Lastwagen sowie Landmaschinen, Spinnereimaschinen, Rollern, Registrierkassen, Kinoparagarten, Separatoren, Preßluftwerkzeugen, Getrieben usw. begonnen. In der folgenden Zeit wurden einige dieser neuen Fertigungen eingestellt, andere ausgedehnt.

In Essen entstand ein Walzwerk zum Herstellen von Blechen aus rostfreiem Stahl und erstmals eine Werkstatt für die Verarbeitung dieser Bleche zu Großapparaturen für die chemische Industrie.

In den 20er Jahren baute die Firma Fried. Krupp eine 15 000-t-Presse, die größte der Welt, zum Schmieden von Blöcken bis 300 t.

Um einen neuen Weg zu zeigen, wurde im Jahre 1924/25 die erste Turbinen-Lokomotive mit Dampfantrieb für die Deutsche Reichsbahn gebaut, die sich trotz mancher Vorzüge nicht durchsetzen konnte. In den gleichen Jahren nahm Krupp den Bau von Diesellokomotiven auf. Unter maßgeblicher Beteiligung von Krupp wurde der dieselelektrische Antrieb und später auch der dieselhydraulische Antrieb über ein stufenlos regelbares Strömungsgetriebe entwickelt.

Während des zweiten Weltkrieges (im Jahre 1943) trat Gustav Krupp von Bohlen und Halbach von der Leitung des Unternehmens zurück, das er dreieinhalb Jahrzehnte erfolgreich durch wechselvolle Geschicke gelenkt hatte. Er überließ die Leitung seinem ältesten Sohn Alfred Krupp (Bild 2), der von diesem Zeitpunkt an alleiniger Inhaber der Firma ist.

Waren schon die Folgen des verlorenen ersten Weltkrieges für die Firma Fried. Krupp außerordentlich schwerwiegend, so stellten die Folgen des verlorenen zweiten Weltkrieges alles Dagewesene in den Schatten. Alfred Krupp von Bohlen und Halbach und die Herren des damaligen Direktoriums wurden inhaftiert.

Ein Drittel der Werkseinrichtungen, berechnet nach den Gebäudelflächen, war durch Kriegseinwirkung vollständig vernichtet und der Rest teilweise schwer beschädigt. Viele glaubten, das Ende der Firma Krupp sei wirklich gekommen, aber allen Unkenrufen zum Trotz überstand sie auch diese in ihrer Geschichte schwerste Prüfung dank der Solidarität des auf dem Werk verbliebenen Stammes von treuen Mitarbeitern, denen es in den Jahren nach dem Krieg gelang, einen Teil der Werkseinrichtungen zu erhalten und Schritt für Schritt wieder aufzubauen, soweit die Wirtschaftslage dieses ermöglichte.

Das wenig beschädigte Hüttenwerk Borbeck wurde damals vollständig demontiert und nach der Sowjetunion transportiert. Die Rüstungsbetriebe, die metallurgischen Betriebe und auch Teile der stahlverarbeitenden Betriebe wurden demontiert oder verschrottet. Bis zu 5 000 Mann waren im sogenannten Stadteinsatz jahrelang damit beschäftigt, Aufräumarbeiten durchzuführen, um Kanalisation, Wasserversorgung, Straßen usw. wieder in Ordnung zu bringen, um dadurch der Stadt wieder eine Lebensmöglichkeit zu geben.

Zu den ersten größeren Betrieben der Gußstahlfabrik, die nach dem Kriege wieder in Betrieb genommen worden sind und anfangs nur teilweise mit Reparaturarbeiten beschäftigt werden konnten, gehörten die Lokomotivfabrik, Widiafabrik, Baubetriebe, Gießerei und Schmiede, Elektrowerkstätten und die Essener Maschinenfabriken.

Auf einem Teil des Geländes der Gußstahlfabrik wurden auf Druck der Besatzung durch die Stadt Essen und das Land Nordrhein-Westfalen gewerbliche und industrielle Unternehmen angesiedelt.

Das Dieselmotorenprogramm der Germaniawerft, die man dem Erdboden gleich gemacht hatte, wurde im kleinen in der Lokomotivfabrik aufgezogen und später durch eine Lizenznahme von Burmeister & Wain auf große Schiffsmotoren erweitert.

Aus dem früheren technischen Büro wurde die Krupp-Technik gegründet, die heute unter dem Namen Krupp-Industriebau firmiert und ein wesentlich erweitertes Arbeitsgebiet hat.

Die Krönung des Wiederaufbaues wäre die Wiederaufnahme der Edstahlerzeugung in Essen gewesen, auf die viele Abnehmer mit großer Ungeduld gewartet haben. Sie wurde aber verhindert durch eine einschneidende Maßnahme, die Anordnung der Alliierten von 1953, welche die Firma Krupp besonders hart getroffen hat, nämlich das Verbot der Wiederaufnahme der Stahlerzeugung

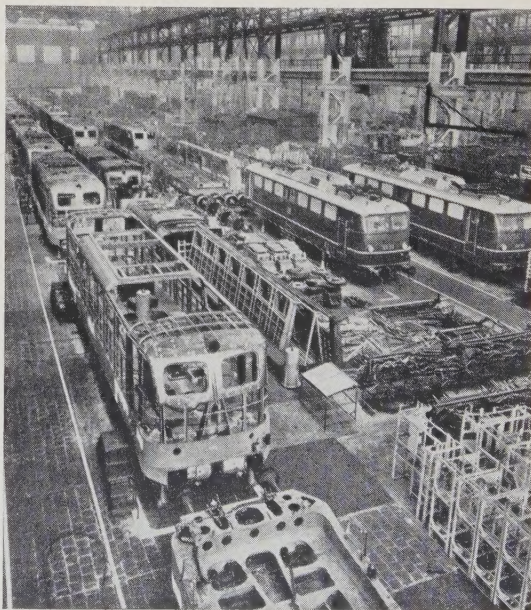


Bild 3. Halle für den Bau von Elektrolokomotiven.

in Essen und die Verkaufsaufgabe des Montanbesitzes, also der Berg- und Hüttenwerke. Am 12. März des gleichen Jahres konnte *Alfried Krupp* nach 8jähriger Unterbrechung die Leitung seiner Werke wieder übernehmen. Aus diesem Anlaß hat er die Grundsätze und Ziele der künftigen Geschäftspolitik bekanntgegeben, die insbesondere auf die Fortsetzung der alten Kruppschen Tradition technischen, wirtschaftlichen und sozialen Fortschrittes abzielen. In diesem Sinn ist der Neuaufbau der Forschungsstätten in den verschiedenen Krupp-Bereichen zu verstehen. In Essen wurde die Versuchsanstalt bei der WIDIA-Fabrik für die Belange der Essener Betriebe errichtet. Hier wurden in den letzten Jahren umfangreiche Versuche auf dem Gebiet der Stahlerzeugung nach dem Sauerstoffaufblase-Verfahren, dem sogenannten LD-Verfahren, durchgeführt, die zu einer wirtschaftlich besonders interessanten Lösung beim Verblasen von phosphorhaltigem Roheisen geführt haben.

Die Versuchsanstalt des Hüttenwerkes Rheinhausen führt gleichzeitig auch die Aufgaben des Maschinen- und Stahlbaus durch. Darüber hinaus sind in Rheinhausen auch besondere Prüfeinrichtungen für die vom Hüttenwerk entwickelten Spannbetonstähle vorhanden.

Auch der Bochumer Verein verfügt über eine Versuchsanstalt, die auf die Erfordernisse eines Edelstahlwerkes ausgerichtet ist.

Alle Versuchsanstalten sind mit den modernsten Apparaten für die chemische, mechanische, metallographische und physikalische Prüfung der Rohstoffe und Erzeugnisse ausgerüstet und bieten Forschungsmöglichkeiten, die der Weiter- sowie der Neuentwicklung Kruppscher Erzeugnisse dienen.

Rund 1000 Belegschaftsmitglieder sind in den Versuchsanstalten und Laboratorien tätig, die gleichzeitig auch in verhältnismäßig weitem Rahmen Grundlagenforschung betreiben, aus der sich indirekt Ansatzpunkte für die Zweckforschung ergeben.

Ein Teil der Forschungsarbeiten finden ihren Niederschlag in den Veröffentlichungsorganen der Firma Krupp, den „Technischen Mitteilungen Krupp“, und auch in den Technischen Mitteilungen des Hüttenwerkes Rheinhausen und in einer Reihe anderer einschlägiger Fachzeitschriften.

Das heutige Produktionsprogramm des Krupp-Konzerns reicht von der Planung und Errichtung schlüsselfertiger Hüttenwerke bis zu den kleinsten Schrauben. Es umfaßt weite Gebiete für den Erz- und Kohlenbergbau, für die Hüttenindustrie, für den Verkehr (Bild 3), für die Bauwirtschaft, für die chemische Industrie und schließlich für den allgemeinen Maschinenbau.

fi

BÜCHER

DK 621.3

Allgemeine Elektrotechnik. Von A. von Weiss. 3., verb. und erw. Aufl. Mit 380 S., 276 B., Format 17 cm × 24,5 cm. C. F. Winter'sche Verlagshandlung, Prien 1961. Preis Ganzln. 26,50 DM.

Bei der vorliegenden 3. Auflage blieb die bewährte Darstellungsart der 2. Auflage erhalten. Diese beschränkt sich auf das Wesentliche, wie es der gedachten Benutzung neben der Vorlesung entspricht. Wichtige Erkenntnisse werden nicht nur in Form mathematischer Gleichungen, sondern jeweils auch durch besonders hervorgehobene Sätze verständlich gemacht.

Überall ist die Absicht des Verfassers erkennbar, den Leser zu eigenem Nachdenken anzuregen und ihm so durch eigene Arbeit zum Erkennen der physikalischen Vorgänge zu führen, was im Vorwort mit Recht als die Grundlage wirklichen Wissens bezeichnet wird. Dieser eigenen Arbeit dienen die zahlreichen, jedem Kapitel beigegebenen Beispiele und Aufgaben, die aus der Praxis sowohl der Starkstrom- als auch der Fernmeldetechnik ausgewählt wurden, wie überhaupt außer den reinen Grundlagen an vielen Stellen auch praktische Hinweise gebracht und Meßmethoden angegeben werden.

Der Stoff und dessen Einteilung blieben nahezu unverändert. Im ersten Kapitel werden als Einführung die Grundeinheiten des MKSA-Systems gebracht, die fast durchweg benutzt werden. (In den Beispielen werden aber auch noch leider die durch das MKSA-System zu ersetzenden alten Einheiten benutzt). Die Formel- und Schaltzeichen entsprechen den Festlegungen des AEF und den neuesten Normen. Ferner erklärt die Einführung kurz die Begriffe Größengleichung und Zahlenwertgleichung und bringt das Grundsätzliche über Vektoren und deren rechnerische Behandlung. Das zweite Kapitel enthält die Grundbegriffe des elektrostatischen Feldes, das mit Recht als „die Eingangspforte zur gesamten allgemeinen und theoretischen Elektrotechnik“ bezeichnet wird. Nach dem Kapitel über die Grundbegriffe der stationären elektrischen Ströme folgen Ausführungen über Elektronen- und Ionenströme, die auch das Gebiet der Halbleiter umfassen, sowie die Behandlung des magnetischen Feldes. Die Kapitel über die Grundgesetze der Wechselströme und über mehrwellige Systeme werden in bewährter Art wirkungsvoll ergänzt durch das folgende Kapitel, in dem

die mathematischen Grundlagen und die Anwendung der komplexen Rechnung in der Wechselstromtechnik behandelt werden. Hierauf bauen die Kapitel Wechselfelder und Wechselstromverluste, Ortskurventheorie, Schaltvorgänge, Schwingungskreise und Starkstromleitungen zur Energieübertragung auf. Da es schwer ist, eine Grenze zwischen der allgemeinen und der theoretischen Elektrotechnik zu ziehen, findet der Leser auch einiges, was vielleicht über den Begriff „Allgemeine Elektrotechnik“ hinausgeht.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten verwendeten Symbole, ein Schrifttumsverzeichnis mit 16 einführenden oder ergänzenden Buchtiteln, ein Anhang mit Stoff- und Naturkonstanten, Wicklungsangaben für Lackdraht, Zusammenstellung einiger Einheiten sowie ein Sachverzeichnis beschließen das sehr nützliche Buch.

G. K. M. Piestori

DK 621.3.029.36/65 + 621.396.37

Mikrowellentechnik und Antennen. Nachrichtentechnische Fachberichte Bd. 23. Mit 136 S., 263 B., Format 21 cm × 30 cm. Hrsg. J. Wosnik. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1961. Preis kart. 42,— DM; für NTG/VDE-Mitglieder 37,80 DM.

Der Band 23 der Nachrichtentechnischen Fachberichte umfaßt die Vorträge, die vom 27. bis 30. April 1960 auf der Münchener Fachtagung der Fachausschüsse „Mikrowellentechnik“ und „Antennen“ der Nachrichtentechnischen Gesellschaft (NTG) im VDE gehalten wurden.

Eingeleitet wurde diese Tagung durch einen zusammenfassenden Vortrag von Prof. Gundlach über den Werdegang und heutigen Stand der Mikrowellentechnik. Eine Reihe der folgenden Berichte befaßt sich mit Bauelementen der Mikrowellentechnik. Einen besonderen Platz nehmen dabei die nichtreziproken, auf der Verwendung von Ferriten beruhenden Schaltelemente ein, wie Richtungsleitungen und Richtungsablenker, die in Vorträgen von Severin, Deutsch und v. Haza-Redlitz besprochen wurden. Hinzu kommen Antennenweichen, Hohlleiterverzweigungen und Bandfilter als reziproke Bauelemente. Weitere Vorträge schildern Untersuchungen an Molekularverstärkern, an dielektrischen Wellenleitern für die Fortleitung von Millimeterwellen und an Oberflächenleitungen zur Antennenspeisung. Neben den Bauelementen kommen auch Meßverfahren an ihnen zur Sprache, wobei das Schwinggewicht auf schnellen und rationellen Verfahren zur Fertigungskontrolle liegt.

Eine zweite Gruppe von Vorträgen auf dem Gebiet der Mikrowellentechnik befaßt sich mit Arbeiten um die Ausnutzung der H_{01} -Welle im Rundhohlleiter als Übertragungsmittel für den Nachrichtenverkehr. Es wird über Meßverfahren zur Prüfung von Rundhohlleitern auf Reflexionsfreiheit, Wellentypenreinheit und Dämpfung berichtet, über systematische theoretische Untersuchungen der Einflüsse von Geometriestörungen auf die Übertragungseigenschaften sowie über praktische Erfahrungen mit der Mehrfachausnutzung von Rundhohlleitern mit zwei Polarisationsrichtungen. Die letztgenannten Vorträge lassen die Anstrengungen erkennen, mit denen an dieser höchst aktuellen Aufgabe gearbeitet wird.

Die unter das Stichwort „Antennen“ einzuordnenden Vorträge lassen sich in zwei Gruppen gliedern. Die eine behandelt neuere spezielle Antennenformen; als Beispiele hierfür seien genannt: eine verkürzte Hornparabolantenne, genannt Muschelantenne; die Gruppe der logarithmisch-periodischen Antennen; Antenne mit zirkularer Polarisation für die Radartechnik; ein rückwärtsgerichteter Längsstrahler mit guten Bündelungseigenschaften sowie eine Hornantenne, die — ins Riesenhafte vergrößert — für den Kurzwellenempfang gebaut wurde. Die zweite Gruppe, zu denen die Vorträge von Prof. Meinke, Prof. Zinke, Störh und Vlcek zählen, gibt Zeugnis von Arbeiten auf der Suche nach der optimalen Breitbandantenne, d. h. einer Antenne, deren Fußpunktswiderstand und Strahlungsdiagramm in einem weiten Frequenzbereich möglichst konstant bleibt.

In den drei Tagen dieser Fachtagung konnte nur ein kleiner Ausschnitt von aktuellen Problemen und Arbeiten hieran zur Sprache kommen. Den hier gehaltenen 23 Vorträgen gelang es, Licht auf einige der interessantesten Tagesfragen aus den Gebieten der Mikrowellen- und Antennentechnik zu werfen.

W. Rehwald

DK 517.433

Operatorenrechnung. Mit Anwendungen auf technische Probleme. Von J. P. Schouten. Mit 232 S., 128 B., Format 16 cm × 24 cm. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1961. Preis Ganzln. 31,50 DM.

Wenn man die Ankündigung des Vorworts, die Operatorenrechnung solle „im Geist von O. Heaviside“ aufgebaut werden, und das erste Kapitel liest, das die Operatoren mittels Impulse zu „begründen“ versucht, könnte man glauben, der Heaviside-Kalkül solle hier fröhliche Auferstehung feiern. Auf diese irreführende Einleitung folgt dann aber zum Glück nichts anderes als die Behandlung gewisser elektrotechnischer Probleme mit Laplace-Transformation, und zwar Kapitel 2 (§ 7—15): Schwingungskreise mit konzentrierten Konstanten, Kapitel 3: Der Fall periodischer Eingangsfunktionen, Kapitel 4: Die elektrische Doppelleitung unter verschiedenen Bedingungen (unendliche und endliche Länge, verlustlose und verlustbehaftete Leitung usw.), Kapitel 9: Kettenleiter (Lösung der Rekursionsgleichung für die Kettenglieder im Bildraum, Rücktransformation in den Originalraum für Sonderfälle

wie Tief-, Hoch-, Bandpaß usw.), Kapitel 10: Thomsonkabel, d. h. Wärmeleitungs-gleichung (Entwicklung der Lösung in konvergente und asymptotische Reihen). Ferner ist für den Ingenieur das Kapitel 7: Transformation einiger spezieller Funktionen, von Interesse.

Der Wert des Buches liegt in der Durchrechnung vieler spezieller Beispiele, insbesondere für die Doppelleitung und den Kettenleiter, und hier kann der Ingenieur sich bei manchen seiner Probleme eine Anleitung für die Verwendung der Laplace-Transformation holen. Dagegen wird er gut tun, von den übrigen Kapiteln, die sich mit den theoretischen Grundlagen der Laplace-Transformation beschäftigen, nur die Sätze, nicht aber deren Beweise zu lesen. Diese „Beweise“ beruhen meist auf der bedenkenlosen Vertauschung von Grenzübergängen, worin gerade die eigentliche mathematische Schwierigkeit besteht, und beweisen daher im Grunde gar nichts.

Für den fundamentalen Lerchschens Eindeutigkeitssatz (Kapitel 5) wird zunächst weitausholend der Weierstraßsche Approximationsatz bewiesen, aber der Lerchsche Satz selbst wird falsch formuliert, und der angeblich aus einem Buch des Referenten stammende Beweis ist mißverstanden. Das Kapitel 8 über asymptotische Entwicklungen der Originalfunktion basiert zwar richtig auf der komplexen Umkehrformel mit winkelförmig deformiertem Integrationsweg, bringt aber äußerst umständliche Beweise, die infolge Benutzung falscher Relationen unbrauchbar sind. Unzutreffend sind auch die Angaben über die Addition der von mehreren Verzweigungspunkten der Bildfunktion gelieferten asymptotischen Entwicklungen (bei reellem $t \rightarrow \infty$ kommen bekanntlich nur die am weitesten rechts gelegenen Verzweigungspunkte zum Zug). Die asymptotischen Entwicklungen kann man heutzutage auf exakte Weise ganz einfach und viel allgemeiner darstellen (vgl. Doetsch, G.: Einführung in Theorie und Anwendung der Laplace-Transformation. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart 1958, S. 226 ff.).

Das Buch würde an Umfang verlieren, aber an Wert gewinnen, wenn die nicht stringenten Beweise weggelassen und dafür denjenigen Ingenieuren, die sich für die Beweise interessieren, Hinweise auf die ernsthafte Literatur über die Laplace-Transformation gegeben würden.

G. Doetsch

DK 618.14-523 8

Grundlagen und Bauelemente elektronischer Ziffern-Rechenmaschinen. Von G. Haas. Mit 264 S., 179 B., Format 15,5 cm \times 23 cm. Philips Technische Bibliotheek. N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Holland) 1961. Preis Ganzln. 19,— DM.

Das Buch ist eine Einführung in die digitale Rechentechnik und behandelt in drei Abschnitten deren Grundlagen, die Bauelemente und die daraus bestehenden Schaltungen. Die Darstellung der Grundlagen beginnt mit einer knappen Beschreibung der Arbeitsweise digitaler Rechenmaschinen, der Zahlensysteme und binären Verschlüsselung des Dezimalsystems. Logische Schaltungen, Zähler und die verschiedenen Speichersysteme werden beschreibend dargestellt, und schließlich sind darauf aufbauend einige Beispiele für digitale Rechenwerke gebracht. An Bauelementen werden die Vakuumröhren, Glimmerrelaisröhren Halbleiterdioden, Flächentransistoren und die magnetischen Werkstoffe mit rechteckförmiger Hystereseschleife besprochen. Die für die digitalen Schaltungen wichtigen Eigenschaften, das statische und dynamische Verhalten, werden eingehend erläutert. Der letzte und größte Abschnitt bringt Schaltungsbeispiele. Hier findet man konkrete Angaben über logische Schaltungen, bistabile und monostabile Kipperschaltungen, Zähler der verschiedensten Art, Register, Schieberegister und Speicher. Aus der Fülle der Möglichkeiten kann natürlich nur eine Auswahl gebracht werden. Die angegebenen Schaltungen sind genau besprochen, und teilweise werden alle Dimensionierungen angegeben.

Es ist nicht die Absicht des Buches, den Leser über die Organisation des Rechenablaufes oder die Programmierung digitaler Rechenmaschinen gründlich zu unterrichten. Hier bringt es nur, was zum Verständnis unbedingt erforderlich ist. Das Buch wendet sich vielmehr an den technisch interessierten Leser, dem es eine sehr gute Einführung in die digitale Schaltkreistechnik bietet. Es ist einfach zu lesen und setzt keine höheren Vorkenntnisse voraus.

E. Kettel

DK 614.898.5 : 340.144

Die Strahlenschutzverordnungen. Bd. 1. Erläutert von H. R. Beck. Mit 372 S., Format 14,5 cm \times 22 cm. Verlag Franz Vahlen GmbH., Berlin und Frankfurt a. M. 1961. Preis Ganzln. 29,— DM.

Viele der im Strahlenschutz tätigen Vertreter der verschiedenen Fachgebiete sind teils mit den wissenschaftlichen Grundlagen, teils mit den juristischen Formulierungen der „Ersten Strahlenschutzverordnung“ vom 24. Juni 1960 nicht vertraut. Ihnen den Zugang zum Verständnis der Verordnung und der sich aus ihr ergebenden Konsequenzen zu erleichtern, ist die Aufgabe der vorliegenden Abhandlung. Die Verordnung setzt zunächst die Kenntnis der physikalischen und biologisch-medizinischen Grundlagen des Strahlenschutzes sowie der verwendeten Begriffe und Einheiten voraus; diese werden in knapper, aber ausreichender Form in Teil A abgehandelt. Ein Anhang gibt eine Übersicht der zur Zeit geltenden Strahlenschutzvorschriften, die Rechtsgrundlagen für die Strahlenschutzverordnungen aus dem Atomgesetz sowie den vollen Wortlaut der Euratom-Grundnormen, auf denen die Strahlenschutzverordnung bekanntlich basiert und zu deren Einhaltung die

Bundesrepublik vertraglich verpflichtet ist. Teil B enthält den Text der Strahlenschutzverordnung selbst, während der Kommentar zu den einzelnen Paragraphen in Teil C gegeben wird. In einem weiteren Anhang werden andere, neben der Strahlenschutzverordnung noch gültige Vorschriften für den Strahlenschutz angeführt. Das Kernstück der Abhandlung, der Kommentar, ist detailliert und nahezu erschöpfend. Man vermißt an wesentlichen Punkten lediglich ein näheres Eingehen auf gewisse Zweifelsfragen bzw. Widersprüche der Verordnung (§ 25 und 31), welche die Festsetzung der maximal zulässigen Dosen im Falle einer Teilkörperbestrahlung und bei Inkorporation von Radionukliden betreffen. Wünschenswert wäre schließlich die Wiedergabe der neueren Empfehlungen der internationalen Kommission für Strahlenschutz 1959, durch welche die in der vorliegenden Abhandlung angeführten älteren Empfehlungen 1954 überholt sind.

A. Catsch

DK 621.317.333.4=20

Detection and location of discharges. Von F. H. Kreuger. Mit 161 S., zahlr. B., Format 16,5 cm \times 24,5 cm. Hrsg. N. V. Nederlandsche Kabelfabrieken, Delft.

Der Verfasser berichtet über Arbeiten, die 1957 bis 1960 bei dem Kabelwerk Delft ausgeführt wurden. Ausgehend von den aus dem Schrifttum bekannten Meßmethoden, die kurz beschrieben werden, wird eine Meßmethode mit einer als Differentialbrücke modifizierten Scheringbrücke dargestellt. An Stelle von Normalkondensator und Meßobjekt treten hier zwei gleichartige Meßobjekte, z. B. zwei Adern eines Kabels oder zwei Abschnitte eines Einleiterkabels oder einer Ader. Entladungen innerhalb des Meßobjektes (nicht dagegen solche außerhalb des Kabels an den Kabelendverschlüssen oder jenseits derselben) werden quantitativ an einem Oszillographen angezeigt.

Anschließend werden zwei Apparaturen beschrieben, mit denen an einer durchlaufenden ungeschirmten, beziehungsweise mit halb-leitendem Material geschirmten Ader der Ort von Entladungen bestimmt und markiert werden kann. Die neuartige Apparatur für Adern mit halbleitendem Schirm arbeitet mit der erwähnten Differentialbrücke. Die Ader, an deren Leiter die Prüfspannung gelegt wird, läuft zwischen zwei motorisch angetriebenen Kabeltrommeln durch das Gerät. Der Ort einer Entladung kann während des Durchlaufs auf 0,1 m genau eingemessen werden. Dieses Kabelstück kann zurückgeholt werden. Mit einem durch Fernbedien-ung einschaltbaren Feinmeßgerät kann der Entladungsort dann auf 2 mm genau lokalisiert werden. Durch eine Farbnebelspritze kann man die eingemessene Stelle während des Durchlaufs auf der Ader kennzeichnen.

Schießlich wird ein Gerät für die Erzeugung von Standard-Entladungen beschrieben, das zur Eichung der Apparatur hinsichtlich der Intensität der Entladungen dient.

Die interessante Arbeit ist klar und übersichtlich, enthält genaue Dimensionsangaben für die beschriebenen Geräte und ein umfangreiches Schrifttumsverzeichnis. Sie wird jedem Hersteller von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln nützliche Anregungen geben. Ein Nachweis von Ionisationserscheinungen dürfte allerdings einfacher mit einer spannungsabhängigen Verlustfaktormessung durchzuführen sein. Die neuartigen Ortungsmethoden können dazu beitragen, die Fertigung zu verbessern, zumal sie zum Teil zwischen den verschiedenen Arbeitsgängen der Kabelherstellung anwendbar sind.

Hilgendorff

DK 53.007.2=20

Modern physics for the engineer. Mit 383 S., zahlr. B. und Taf., Format 15,5 cm \times 24 cm. Hrsg. L. N. Ridenour und A. Nierenberg. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1961. Preis Ganzln. 74 sh.

Es ist erstaunlich, welcher Stab hervorragender Spezialisten in diesem zweiten Band der „Modernen Physik für den Ingenieur“ zusammengekommen ist. Die bekanntesten der 16 Autoren, deren jeder sein Spezialgebiet behandelt, sind wohl der Nobelpreisträger Segré und der durch seine Streuexperimente bei sehr hohen Geschwindigkeiten viel beachtete Amerikaner R. Hofstadter.

Dem ersten Band von 1954 folgt nun der zweite mit Übersichts-vorträgen, die 1957/58 in San José, Los Angeles und San Diego gehalten wurden. Der Band hat drei Kapitel: Naturgesetze, Astrophysik (Man's physical environment) und Technisches. Den meisten Raum nimmt das erste Kapitel ein, in dem die neuen Elementarteilchen, ihre Modelle, Kristallaufbau, flüssiges Helium, Supraleitfähigkeit und magnetohydrodynamische Wellen behandelt werden. Das zweite Kapitel ist den Kernreaktionen in Sternen, der Radioastronomie und dem Ursprung des erdmagnetischen Feldes gewidmet. Das dritte Kapitel schließlich beschäftigt sich mit Kernfusion, Kernreaktoren, Beschleunigern und Problemen aerodynamischer Forschung.

Das Buch hat ein hohes Niveau und stellt in einzelnen Artikeln auch erhebliche theoretische Ansprüche. Wenn es dem amerikanischen Ingenieur angepaßt ist, so ist das ein Zeichen für das hohe wissenschaftliche Niveau der amerikanischen Technik. Der Referent möchte meinen, daß man den Zusatz im Titel „for the engineer“ getrost hätte fortlassen können, ohne etwa dem Physiker zu nahe zu treten. Es wäre wünschenswert, wenn solche Bücher auch in Deutschland gedruckt würden und auch hier genügend Absatz fänden.

E. Brüche

DK 621.37=20

Linear systems analysis. Von P. E. Pfeiffer. Mit 538 S., zahlr. B. und Taf., Format 15 cm × 23,5 cm. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1961. Preis Ganzln. 97,— sh.

Obwohl die in der Praxis auftretenden elektrischen und mechanischen Systeme nur selten streng linear sind, so sind diese doch vielfach im Kleinen hinreichend genau linear, d. h. man darf dann bei kleinen Aussteuerungen und Schwingungen mit linearen Gleichungen rechnen. Diese Tatsache ist sehr vorteilhaft, da die mathematische Theorie linearer Systeme, insbesondere solche, die sich mit zeitlich konstanten Koeffizienten beschreiben lassen, gut ausgebaut ist und als praktisch vollkommen gelten kann. Im übrigen geht auch dem Studium nichtlinearer Systeme im Großen immer eine Untersuchung des linearisierten Systems im Kleinen voraus. Zur Analyse stationärer rein sinusförmiger Vorgänge benötigt man hauptsächlich die lineare Algebra, genauer gesagt, die Matrizenrechnung. Mit der Matrizenrechnung lassen sich allgemeine Betrachtungen nicht nur elegant formulieren, sondern auch Umformungen in kurzer Form allgemeingültig erledigen. Um nun von den stationären sinusförmigen Vorgängen auf nichtsinusförmige Vorgänge schließen zu können, benötigt man weiter die Verfahren der Fourierreihen für periodische Vorgänge und für nichtperiodische Vorgänge die Verfahren der Fourier- oder Laplacetransformation. Ein anderer direkter Weg führt auch über den Operatorenkalkül zu den Lösungen dieser Aufgaben. Zur Betrachtung gewisser analytischer Funktionen im Komplexen, wie sie als Übertragungsfunktionen linearer Systeme auftreten, benötigt man außerdem noch die Ergebnisse der Funktionentheorie (z. B. auch zur Herleitung der Stabilitätskriterien). Alle diese Verfahren werden in diesem Buch in anschaulicher Weise eingeführt und eingehend an Beispielen aus der Mechanik und der Elektrotechnik erläutert. Die Theorie der Signalfluß-Graphen nach S. J. Mason erleichtert die Handhabung mehrfach gekoppelter Systeme. In einem letzten Kapitel werden die Rückkopplung und die Stabilität rückgekoppelter Systeme nach Ortskurvenkriterien behandelt. Jedes Kapitel enthält Übungsaufgaben und mit Kommentaren versehene Schrifttumshinweise.

Dieses recht anschaulich und lebendig geschriebene Buch kann jedem, der es zum Studium oder als Grundlage für den Unterricht benutzen will, empfohlen werden.

H. Edelmann

DK 621.316.7=20

Adaptive control systems. Von E. Mishkin und L. Braun, jr. Mit 542 S., zahlr. B. und Taf., Format 15,5 cm × 23,7 cm. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1961. Preis Ganzln. 6 £ 8 sh.

Geschlossene Regelkreise sind — und das ist einer der Hauptgründe für ihre Anwendung — verhältnismäßig unempfindlich gegenüber Änderungen ihrer Parameter. In manchen Regelstrecken jedoch ändern sich Parameter in so weiten Grenzen, daß sie dadurch das dynamische Verhalten des ganzen Kreises unzulässig verschlechtern und eine selbsttätige Nachstellung der Reglerdaten notwendig machen. Besonders akut sind solche Probleme bei modernen, schnellen Flugzeugen und Raketen mit ihren stark veränderlichen Umgebungsbedingungen, und von hier ging der hauptsächlichste Anstoß für die zahlreichen Arbeiten der letzten Jahre über selbststellende Systeme aus.

Das vorliegende Buch stammt von 11 verschiedenen Autoren und hat mehr den Charakter einer Sammlung von — ausgezeichnet geschriebenen und für sich allein lesbaren — Aufsätzen. Das erste Kapitel leitet mit den Grundgedanken und den Grundelementen selbststellender Systeme ein. Der folgende Abschnitt „Lineare Systeme“ faßt in mehreren Kapiteln Bekanntes zusammen und bringt Signalflußbilder, Beschreibung und Bestimmung von dynamischen Parametern, einige Beispiele für verzwickte Regelprobleme sowie ein knappes, aber umfassendes Kapitel über Abtastsysteme. Ähnlich ist ein weiterer Abschnitt den nichtlinearen Systemen gewidmet unter Betonung der Beschreibungsfunktion und Phasenebene; die von Wiener vorgeschlagene Methode, nichtlineare Systeme mit statistischen Methoden zu behandeln, ist angedeutet. Der letzte Abschnitt mit „ausgewählten Kapiteln“ moderner Regeltheorie und angrenzender Gebiete gibt eine Einführung in die Digitaltechnik und die Theorie der Spiele, der Entscheidungsprobleme usw.

Dazwischen kommen im dritten Abschnitt auf nur 104 Seiten die eigentlichen selbststellenden Systeme etwas zu kurz. Gebracht wird eine ganze Reihe von ausgeführten Beispielen, allerdings fast ohne tiefere Einzelheiten. Besonders knapp behandelt ist leider das so wichtige und schwierige Problem, die zu regel-

den Parameter überhaupt erst während des laufenden Betriebes zu messen. Fragen der Meßzeit und der Stabilität sind kaum angedeutet. Eine ordnende Systematik fehlt, aber dafür ist das Gebiet auch zu neu und zu sehr im Fluß.

Das Buch ist jedoch von hohem Wert, da es einen gedrängten Überblick über die amerikanischen Entwicklungslinien gibt, und wegen seiner Fülle an neuen Gedankengängen wird man es bald als wahre Fundgrube von Anregungen schätzen lernen.

F. Mesch

BERICHTIGUNGEN

Über den Einschaltstrom bei Drehstromtransformatoren

In dem in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 15, S. 471—474, veröffentlichten Aufsatz sind folgende Berichtigungen nachzutragen:

S. 471, rechte Spalte, 2. Absatz, 1. Zeile, muß richtig heißen: ... über den Einschaltstrom konnte ...

S. 472, rechte Spalte, 3. Zeile unter der Legende von Bild 3, muß richtig heißen: ... $\sqrt{3/2} \cdot I_{0\max}$...

S. 474, Bild 7, ist die Bezifferung der Wicklungen vertauscht. Im Bild muß es unterhalb der Wicklungen heißen: 1 statt 2 und 2 statt 1.

Anwendung von Digitalrechnern zur Berechnung von Asynchronmaschinen

In dem in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 17, S. 525—530, veröffentlichten Aufsatz ist folgende Berichtigung nachzutragen:

S. 528, rechte Spalte, 5. Zeile, muß es heißen \leq statt \geq .

Über den Sicherheitsgrad elektrischer Steuerungen und Schaltanlagen im Blickfeld der Automatisierung

In dem in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 18, S. 569—573, veröffentlichten Aufsatz ist folgende Berichtigung nachzutragen:

S. 570, Bild 2, muß der Multiplikator 10^{-6} an der Ordinate gestrichen werden.

Wege zur Eingliederung der Spannungs- und Blindleistungsregelung in eine totale Netzregelung

In dem in ETZ-A Bd. 81 (1961) H. 18, S. 557—568, veröffentlichten Aufsatz ist folgende Berichtigung nachzutragen:

S. 558, linke Spalte, 18. Zeile, muß richtig heißen: ... $r/\omega l$ für ...

Die Bedeutung der IEC für die Entwicklungsländer

In dem in ETZ-A Bd. 82 (1961) H. 20, S. 637—641, veröffentlichten Aufsatz ist folgende Berichtigung nachzutragen:

S. 641, rechte Spalte, 6. Zeile von unten, muß richtig heißen: ... in welchem Maße nationale ...

Mechanische Filter für die Nachrichtentechnik

In dem in ETZ-A Bd. 81 (1961) H. 23, S. 754, veröffentlichten Referat ist folgende Berichtigung nachzutragen:

Der erste Summand in der ersten Gleichung muß richtig lauten: ... $L di/dt$...

Folgende Aufsätze erschienen in der ETZ-B vom 11. Dezember 1961
Heft 25

O. Klein: Moderne Selen-Gleichrichter.

K. Hamerak: Gleichaufregelung mit Umschlingungsgetrieben.

G. Maus: Die Supraleitfähigkeit und ihre Anwendungsmöglichkeit.

Abschluß des Heftes: 30. November 1961

Schluß des Textteiles

Schriftleitung: Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21; Fernruf 60 341, Fernschreiber (Telex) 04-12 871.

Hauptschriftleiter: Dr.-Ing. P. Jacottet (für den redaktionellen Teil verantwortlich).

Schriftleiter: Dipl.-Ing. F. Meske und Dipl.-Ing. K. Rangs.

Zuschriften für die Schriftleitung nicht an eine persönliche Anschrift, sondern nur an: Schriftleitung der ETZ, Frankfurt a. M. S 10, Stresemannallee 21.

Verlag und Anzeigenverwaltung: VDE-Verlag GmbH, Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstraße 33, Fernruf 34 01 41, Fernschreiber (Telex) 01-84 083.

Anzeigenleitung: Kurt Totzauer.

Bezugspreis (halbjährlich zuzügl. Zustellgebühr) 24,— DM, für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 16,— DM; Ausgabe A und B zusammen 34,— DM, für VDE-Mitglieder - nur durch den VDE-Verlag - 24,— DM. Einzelpreis dieses Heftes 2,— DM.

Druck: Deutsche Zentraldruckerei AG, Berlin SW 61, Dessauer Straße 6/7.